

ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO SOB SOLICITAÇÕES
IMPULSIVAS: OTIMIZAÇÃO E CRITÉRIOS DE SEGURANÇA EM
ATERRAMENTOS DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Roberto Luís Santos Nogueira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela, D.Sc.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Dr. Nelson Henrique Costa Santiago, D.Sc.

Dr. Sérgio Gomes Jr., D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2006

NOGUEIRA, ROBERTO LUÍS SANTOS

Análise de Sistema de Aterramento
Sob Solicitações Impulsivas: Otimização
e Critérios de Segurança em Aterramentos
de Estruturas de Linhas de Transmissão
[Rio de Janeiro] 2006

IX, 156 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal
do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sistemas de Aterramento
2. Análise Transitória
3. Critérios de Segurança

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Os desafios e as conquistas deste trabalho são dedicados sobretudo a Deus e à Nossa Senhora, que sempre se fazem presentes na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que é a origem e sentido da vida.

A meus pais, Carlos e Dalva, que sempre me incentivaram a prosseguir com a minha formação profissional, se preocupando sobretudo com minha educação ética e religiosa e me ensinando a ser perseverante para superar os obstáculos da vida.

Aos meus avós, Aquino, Maria e Arlinda, que através de suas vidas me ensinaram a encarar cada momento da vida como um dom de Deus.

Aos meus irmãos Marcio e Eduardo, por estarem sempre por perto me apoiando e me dando forças nas horas que mais preciso.

À Priscilla, que não somente me ajudou com a sua dedicação em revisar dos textos, mas sobretudo com seu carinho, amor e atenção me animando nos momentos difíceis e me fazendo seguir em frente.

Ao professor e orientador Maurício Aredes, pelo incentivo e principalmente por ter acreditado e confiado em mim.

Ao professor e orientador Carlos Portela, pelas ilustres e precisas orientações que sempre me direcionaram para o caminho adequado.

Ao Nelson Santiago, que mesmo não sendo o oficialmente meu orientador, contribuiu de forma significativa para a conclusão do trabalho.

Aos meus amigos-irmãos Leonardo, Marcus e Michel pelo companheirismo, estima e amizade, e por sempre estarem dispostos a me ajudar.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO SOB SOLICITAÇÕES
IMPULSIVAS: OTIMIZAÇÃO E CRITÉRIOS DE SEGURANÇA EM
ATERRAMENTOS DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Roberto Luís Santos Nogueira

Março/2006

Orientadores: Maurício Aredes
Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Programa: Engenharia Elétrica

Esta dissertação aborda o comportamento de sistemas de aterramento no domínio da frequência e sob regimes transitórios, para frequências de até 2 MHz e solicitações impulsivas, incluindo os efeitos quanto a segurança de pessoas e equipamentos, e a interferência com sistemas de operação e controle.

Em regiões de elevados índices de incidência de descargas atmosféricas e/ou com solos de características desfavoráveis ao desempenho dos aterramentos, os riscos associados às descargas podem ser muito superiores aos obtidos pelos curtos-circuitos à frequência industrial.

A metodologia utilizada para a análise dos aterramentos à frequência industrial é baseada na aproximação das equações eletromagnéticas, considerando o regime estacionário, e não podem ser empregadas para o estudo sob solicitações transitórias. Por sua vez, como os parâmetros elétricos do solo são sensivelmente dependentes da frequência, é essencial considerar esta dependência para se determinar o comportamento em altas frequências e sob transitórios.

Nesta dissertação são avaliados os principais aspectos físicos e as metodologias adequadas para se analisar os aterramentos sob solicitações impulsivas, sendo analisados mais especificamente o comportamento dos aterramentos de estruturas de linhas de transmissão, incluindo os critérios de segurança.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TRANSIENT ANALYSIS OF GROUNDING SYSTEMS: OPTIMIZATION AND
SAFETY CRITERIA IN TRANSMISSION LINES TOWER GROUNDING

Roberto Luís Santos Nogueira

March/2004

Advisor: Maurício Aredes
Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Department: Electrical Engineering

This dissertation covers transient behaviors of grounding systems in the frequency domain. High frequencies and fast transient phenomena are analyzed, in particular its impact on people and equipment safety, system operation and protection, as well as control and data processing systems.

In areas of high incidence of lightning or with unfavorable soil characteristics, the risks associated with lightning discharges may be much higher than those associated with faults in power systems.

The methods applied to the fundamental frequency are based on simplifying assumptions of electromagnetics equations that do not fit in fast phenomena. Moreover, soil parameters are quite sensible to frequency variation. It is essential to consider such frequency dependency to analyze high frequency phenomena and fast transient behavior of grounding systems.

This dissertation presents the main physical and methodological aspects to study transient phenomena in grounding systems, particularly the behavior of tower groundings of transmission lines and safety aspects.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	3
CAPÍTULO 2	CONCEITOS BÁSICOS APLICADOS A SISTEMAS DE ATERRAMENTO	6
2.1	CONDIÇÕES DE RISCO À SEGURANÇA DE PESSOAS	7
2.2	CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS	8
2.3	INCIDÊNCIA NAS INSTALAÇÕES	12
2.4	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO	13
2.5	ATERRAMENTO DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	16
CAPÍTULO 3	METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO	19
3.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL	20
3.1.1	ASPECTOS GERAIS	20
3.1.2	METODOLOGIA ADOTADA	22
3.2	CONDIÇÕES ASSOCIADAS À SEGURANÇA DE PESSOAS.....	33
3.2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	33
3.2.2	CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO	34
3.2.3	CRITÉRIOS DE RISCO.....	36
3.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	43

CAPÍTULO 4 MODELAGEM DA CORRENTE INJETADA NOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO45

4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	46
4.1.1	CONCEITOS BÁSICOS.....	46
4.1.2	PARÂMETROS DAS DESCARGAS.....	47
4.2	ANÁLISE DA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	54
4.2.1	ÍNDICE DE DESCARGAS DE UMA REGIÃO.....	54
4.2.2	MECANISMO DE CAPTAÇÃO DAS DESCARGAS.....	56
4.2.3	ANÁLISE DA LT SOB DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	61

CAPÍTULO 5 ENSAIOS DE CAMPO REFERENTES À ANÁLISE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO.....67

5.1	PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO	68
5.2	IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO.....	71
5.3	APLICAÇÃO DOS ENSAIOS EM UM CASO EXEMPLO.....	76
5.3.1	CONFIGURAÇÕES DE SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	76
5.3.2	MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO.....	79
5.3.3	MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO	80
5.3.4	ENSAIO DE IMPEDÂNCIA	83
5.3.5	MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	87

CAPÍTULO 6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS89

6.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CAMPO.....	89
6.1.1	RESISTIVIDADE DO SOLO × PARÂMETROS DO SOLO EM BAIXA FREQUÊNCIA	89
6.1.2	PARÂMETROS DO SOLO × RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO × IMPEDÂNCIA EM BAIXA FREQUENCIA.....	90
6.1.3	PARÂMETROS DO SOLO × ENSAIO DE IMPEDÂNCIA.....	91
6.2	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS PUBLICADOS ANTERIORMENTE	94
6.2.1	SISTEMA RADIAL.....	94
6.2.2	MALHA DE TERRA	100

6.3	ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	104
6.3.1	CONFIGURAÇÃO 1	105
6.3.2	CONFIGURAÇÃO 2	114
6.3.3	CONFIGURAÇÃO 3	120
6.3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	128
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES.....		135
7.1	TRABALHOS FUTUROS	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		140
ANEXO A EQUAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS ASSOCIADAS A FONTES ELEMENTARES		A.1
A.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	A.1
A.2	FONTE PONTUAL DE CARGA.....	A.3
A.3	FONTE PONTUAL DE INJEÇÃO DE CORRENTE.....	A.5
A.4	FONTE LONGITUDINAL ELEMENTAR DE CORRENTE	A.6
A.5	MODELAGEM DOS CONDUTORES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO	A.7
A.6	REPRESENTAÇÃO DOS FENÔMENOS DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO	A.8

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sistemas elétricos são planejados e constituídos com o objetivo de otimizar a operação e promover a máxima confiabilidade, assegurando a continuidade, a qualidade e a economicidade no fornecimento de energia. Por isso, suas instalações precisam ser projetadas para atender a critérios específicos de desempenho e segurança sob as diversas condições operativas. Nesse contexto, afiguram-se os sistemas de aterramento como elementos de extrema importância para se determinar o comportamento das instalações tanto em regime permanente, como sob curtos-circuitos à frequência industrial ou transitórios eletromagnéticos.

Nos sistemas que utilizam o neutro referenciado, em condições normais de operação, os aterramentos atuam no sentido de estabelecer um referencial comum ao longo das etapas de geração, transmissão e distribuição, operando até mesmo como interligação entre fonte e carga em situações especiais de desbalanços. Sob condições de faltas sustentadas a 60 Hz, devem assegurar os riscos relativos a pessoas e contribuir para a atuação correta e eficaz dos sistemas de proteção e controle.

No que se refere a solicitações transitórias, em alguns casos não sendo tão relevante o fato de o sistema ter ou não o neutro referenciado, os aterramentos atuam como elementos responsáveis por conduzir para o solo a corrente proveniente de surtos como descargas atmosféricas e sobretensões de manobra, oferecendo proteção aos equipamentos susceptíveis a estas solicitações. Adicionalmente, devem oferecer uma blindagem eficaz contra perturbações e interferências nos sistemas de proteção e controle e promover a minimização dos riscos associados à segurança de pessoas.

Contudo, apesar da sua importância, o que se observa na prática é que muitos projetos de sistemas de aterramento são executados exclusivamente a partir da análise à frequência industrial e com base em normas simplistas que, por vezes, estabelecem equações analíticas incapazes de representar coerentemente o comportamento físico dos mesmos. A adoção de métodos empíricos pode não somente colocar sob riscos excessivos pessoas e equipamentos, mas comprometer a própria confiabilidade de uma instalação.

Cumprir observar que mesmo utilizando-se critérios de segurança mais confiáveis e adequadas modelagens computacionais para se analisar o comportamento sob curtos-circuitos a 60 Hz, é de tão relevante importância, ou em determinados casos até mais importante, avaliar o desempenho sob solicitações impulsivas. Pois dependendo do número de descargas atmosféricas da região onde se encontram instalados e do tipo de aplicação dos aterramentos, tais solicitações podem apresentar maior probabilidade de ocorrência que as faltas sustentadas, sendo ainda mais agravante o fato de normalmente apresentarem valores máximos de corrente significativamente superiores (mesmo em se tratando de subestações que possuam elevados níveis de curto).

Todavia, é importante ressaltar também que os curtos-circuitos à frequência industrial, tanto em subestações como em linhas de transmissão, são freqüentemente provocados pela incidência de descargas atmosféricas nestas instalações. Apesar disto, comumente não são realizadas avaliações para o desempenho transitório dos seus aterramentos e nem tão pouco abrangendo os aspectos relativos à segurança de pessoas. Em subestações, as recomendações que normalmente direcionam os projetos neste sentido se referem a um conjunto de critérios e procedimentos quanto à proteção de cablagens e de painéis de instrumentos contra interferências e à utilização de protetores de surto. Tais medidas, se concebidas corretamente, podem até ser eficazes em grande parte dos casos, mas são adotadas sem uma análise criteriosa específica para sua aplicação. Assim, soluções que possam atender a uma determinada instalação podem, em outros casos, colocar indivíduos sob riscos excessivos ou mesmo contribuir para operação indevida ou queima de um equipamento.

No que se refere aos sistemas de aterramento de estruturas de linhas de transmissão, o mais preocupante é que nas linhas que possuam cabos pára-raios e sejam adequadamente

projetadas, a probabilidade de solicitar os aterramentos é muito maior para as correntes impulsivas associadas às descargas atmosféricas que para as correntes a 60 Hz, provenientes de curtos-circuitos. Isto se deve a um conjunto de fatores dentre os quais destacam-se os critérios de desempenho destas instalações, a maior exposição das mesmas à incidência destes fenômenos atmosféricos e o comportamento dos mecanismos associados à captação e propagação das descargas. Por isso, embora a grande maioria das faltas à frequência industrial seja efetivamente originada pela ocorrência de descargas atmosféricas nas linhas, somente uma pequena parcela das descargas que incidem nestas instalações pode desencadear tais curtos-circuitos.

Apesar disto, o único critério de desempenho estabelecido em norma e que também é adotado pelas concessionárias de energia é que os aterramentos de estruturas são projetados para ter um determinado valor máximo de resistência a 60 Hz, sendo dispensadas quaisquer análises quanto à segurança de pessoas (mesmo para curtos-circuitos) e nem tampouco no que se refere ao comportamento transitório dos mesmos.

Este procedimento tem raízes em diversos estudos publicados na literatura onde se procurava demonstrar a existência de uma correlação entre o resultados obtidos para baixas e altas frequências. De certa forma, as dificuldades inerentes ao aspecto computacional e principalmente à modelagem física são empecilhos para que este assunto ainda esteja razoavelmente distante das práticas construtivas utilizadas, embora o que pareça afetar primordialmente tal atitude seja a falta de interesse e a inércia característica do setor.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Neste trabalho, serão abordados diversos assuntos relacionados a sistemas de aterramento, com enfoque mais especificamente aplicado a estruturas de linhas de transmissão. No Capítulo 2, é feita uma abordagem sobre os conceitos básicos utilizados, sendo apresentados e analisados os principais critérios de risco e fenômenos envolvidos, bem como os fatores que mais influenciam o comportamento dos aterramentos, incluindo a modelagem dos parâmetros elétricos do solo e a dependência com a frequência. São também apresentadas as configurações de condutores mais comumente empregadas em estruturas e as suas principais características.

No Capítulo 3 são descritos sumariamente os principais modelos desenvolvidos para a análise dos aterramentos, sendo apresentada mais detalhadamente a modelagem física utilizada para implementar o programa computacional. A metodologia baseia-se na subdivisão dos condutores de um sistema de aterramento em segmentos, sendo estes elementos modelados a partir de fontes infinitesimais de corrente transversal e longitudinal. Os acoplamentos entre segmentos são determinados através do efeito dos campos eletromagnéticos associados a estas fontes elementares. Neste capítulo são também descritos os principais critérios de risco relativos à segurança de pessoas.

O Capítulo 4 trata da modelagem da corrente injetada pelo sistema de aterramento no solo, considerando estatisticamente as principais características e a forma de onda do impulso de corrente. São também avaliados qualitativamente os processos de captação das descargas atmosféricas em linhas de transmissão e instalações.

Serão abordadas no Capítulo 5 as principais metodologias empregadas em medições de sistemas de aterramento, incluindo os aspectos experimentais para obtenção dos parâmetros elétricos do solo em função da frequência e os ensaios para determinar o comportamento dos aterramentos na frequência. São apresentados também os resultados de medições realizadas em amostras de solo e em algumas configurações utilizadas em ensaios.

No Capítulo 6 são realizadas análises comparativas entre os resultados obtidos através das medições de campo e os correspondentes às simulações computacionais com o programa desenvolvido a partir da metodologia apresentada no Capítulo 3. De forma a validar o programa e dar subsídio às simulações posteriores, são confrontados os resultados computacionais com os publicados em trabalhos anteriores. Por fim, são simuladas diferentes configurações de sistema de aterramento de estruturas determinando-se o comportamento da impedância de aterramento e analisando no domínio do tempo, as tensões no próprio sistema de aterramento e as tensões de toque e passo, bem como os riscos associados à segurança de pessoas nas proximidades dos aterramentos.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões sobre os principais conceitos e metodologias utilizados neste trabalho, sendo feita uma análise dos resultados obtidos nas simulações realizadas. São também descritas as propostas de trabalhos futuros.

No Anexo A são mostradas as equações de Maxwell utilizadas para determinar os campos eletromagnéticos no solo e os potenciais escalar e vetor associados às fontes infinitesimais, empregadas na modelagem dos condutores de um sistema de aterramento. É também apresentado o tratamento dos fenômenos de reflexão e refração associados à onda incidente numa interface de separação de dois meios distintos.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS APLICADOS A SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Em se tratando do Sistema Elétrico Brasileiro, a importância dos sistemas de aterramento para o adequado desempenho das instalações tanto em regime permanente, como sob condições de curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, torna-se ainda mais expressiva, devendo ser objeto de cuidadosa análise devido a conjunto de fatores dentre os quais destacam-se a própria topologia do sistema elétrico e as características meteorológicas e físicas existentes no país. Estes fatores associados contribuem de forma significativa para uma maior solicitação dos aterramentos, pois além de o sistema ser caracterizado pela utilização do sistema trifásico com neutro aterrado e estar fortemente concentrado em regiões que apresentam altas densidades de descargas atmosféricas, o solo brasileiro, de um modo geral, não apresenta um comportamento adequado, pois comumente possui elevados valores de resistividade.

O aterramento eficaz do neutro de equipamentos como geradores e transformadores nas subestações confere ao sistema um referencial ao longo dos vários níveis de tensão e permite que defeitos como curtos-circuitos monofásicos ou bifásicos envolvendo a terra, aberturas de fase ou até mesmo pequenos desbalanços de cargas possam ser detectados através da circulação de corrente pelo neutro acima de limites pré-estabelecidos. Admite também hipótese de se utilizar (dentro de condições operativas bem definidas) o próprio sistema de aterramento como um elemento para interligar “fonte” e “carga”, como por exemplo um tipo de sistema de alimentação rural denominado MRT (Monofásico com Retorno pela Terra) e o elo de corrente contínua de um sistema de transmissão bipolar, onde havendo a perda de um dos pólos do sistema mantém-se o intercâmbio de energia através do circuito formado pelo pólo são e pelos eletrodos de terra das subestações.

No entanto, esta topologia de sistema exige a atenção para alguns cuidados, pois sendo o neutro referenciado através do sistema de aterramento, torna-se conveniente conectar também ao mesmo todas as partes metálicas da instalação (carcaças de equipamentos,

estruturas, ferragens de fixação, etc.), uma vez que tensões induzidas, falhas de isolamento interno em equipamentos e até mesmo contatos acidentais com elementos energizados podem submetê-las a tensões elevadas, colocando em prováveis situações de risco pessoas ou outros equipamentos que se encontrem em contato com elas.

2.1 CONDIÇÕES DE RISCO À SEGURANÇA DE PESSOAS

O fato de se aterrar as partes metálicas de uma instalação gera a preocupação de se observar os riscos associados à tensão que aparece entre estas partes metálicas e a superfície do solo na vizinhança das mesmas, quando há o escoamento de uma corrente do sistema de aterramento para solo. Uma situação típica para este tipo de exposição ocorre estando um indivíduo de pé sobre o solo e tocando nestas partes metálicas, a tensão aplicada sobre o mesmo é denominada *tensão de toque*.

Outra situação de risco também comum ocorre através da tensão aplicada entre os pés de um indivíduo, pois como a corrente que escoar através do aterramento origina campos no solo e como estes campos são mais intensos nas proximidades de um sistema de aterramento, ao caminhar sobre estes locais uma pessoa pode se colocar em condição de risco devido à *tensão de passo*. Na figura a seguir são exemplificadas ambas situações de risco.

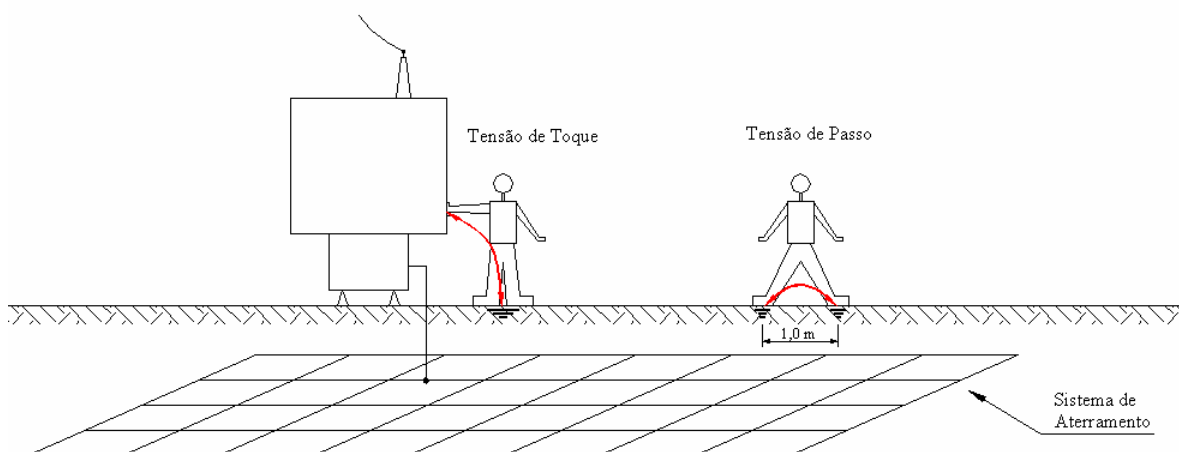


Figura 2.1 – Situações de risco susceptíveis às tensões de toque e passo.

Além dessas, existe também a condição correspondente à *tensão transferida*, que ocorre basicamente devido à indução em condutores pertencentes a circuitos eletricamente

isolados do sistema de aterramento (cujo caminhamento esteja nas proximidades do mesmo) ou aos próprios cabos de aterramento que, por vezes, são utilizados para interligar elementos afastados da área da malha. Se uma pessoa se colocar em contato com tais circuitos (ou equipamentos a eles conectados) ou com os referidos elementos aterrados, poderá se expor à *tensão transferida*. É importante observar que esta situação pode ocorrer tanto na área sobre o aterramento como em locais afastados do mesmo e apesar de ser muito semelhante à *tensão de toque*, se diferencia justamente devido à transferência através dos elementos citados.

Estas situações de exposição e os respectivos critérios de risco associados à segurança de pessoas serão mais profundamente analisados no Item 3.2.

2.2 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS

No que se refere aos aspectos meteorológicos, determinadas regiões do Brasil são caracterizadas por apresentar densidades de descargas atmosféricas extremamente elevadas, mesmo se comparado a níveis mundiais. Este índice é comumente determinado através do nível cerâmico, que corresponde ao número de dias com trovoadas por ano. A Figura 2.2, obtida de [1], apresenta o mapeamento dos níveis cerâmicos em todo o país.



Figura 2.2 – Mapeamento do nível cerâmico no País [1].

Níveis cerâmicos acima de 80, que representa um índice de 15 descargas/km²/ano, conforme apresentado no Item 4.2.1, já são considerados elevados. Por isso, analisando a figura anterior podem ser destacados a parte oeste dos estados de Paraná, São Paulo e Minas Gerais e praticamente todas as regiões Centro Oeste e Norte, que apresentam níveis entre 80 e 140.

Como justamente estas regiões respondem por cerca de 80% da capacidade instalada do País, são nelas que se concentram os grandes troncos de transmissão, sendo a maior densidade de linhas de transmissão, subestações e usinas do sistema elétrico localizada nos

estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Goiás, conforme pode ser observado na Figura 2.3 a seguir, obtida de [2].



Figura 2.3 – Sistema Elétrico Brasileiro [2].

Apesar de o mapeamento do nível cerâmico apresentar uma base de dados consistente e coerente, é crescente a preocupação por parte de pesquisadores, concessionárias de energia e projetistas em se obter informações mais precisas no que se refere ao monitoramento e à classificação das descargas atmosféricas, uma vez que tais fenômenos geralmente desencadeiam situações de risco à segurança de pessoas e equipamentos, podendo causar grandes prejuízos às instalações e até mesmo à própria operação do sistema.

Com a finalidade de mapear sobretudo as regiões onde estão concentrados os principais troncos do sistema elétrico e que também apresentam elevados índices de descargas, objetivando detectar em tempo real a localização dos pontos de incidência e as principais características das mesmas, que foi formada através da parceria entre CEMIG, FURNAS, INPE e SIMEPAR, a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas - RINDAT. Como resultado deste monitoramento pode-se destacar o mapeamento de densidade de descargas apresentado na figura a seguir, fornecida por FURNAS [3], referente à principal região de monitoramento.

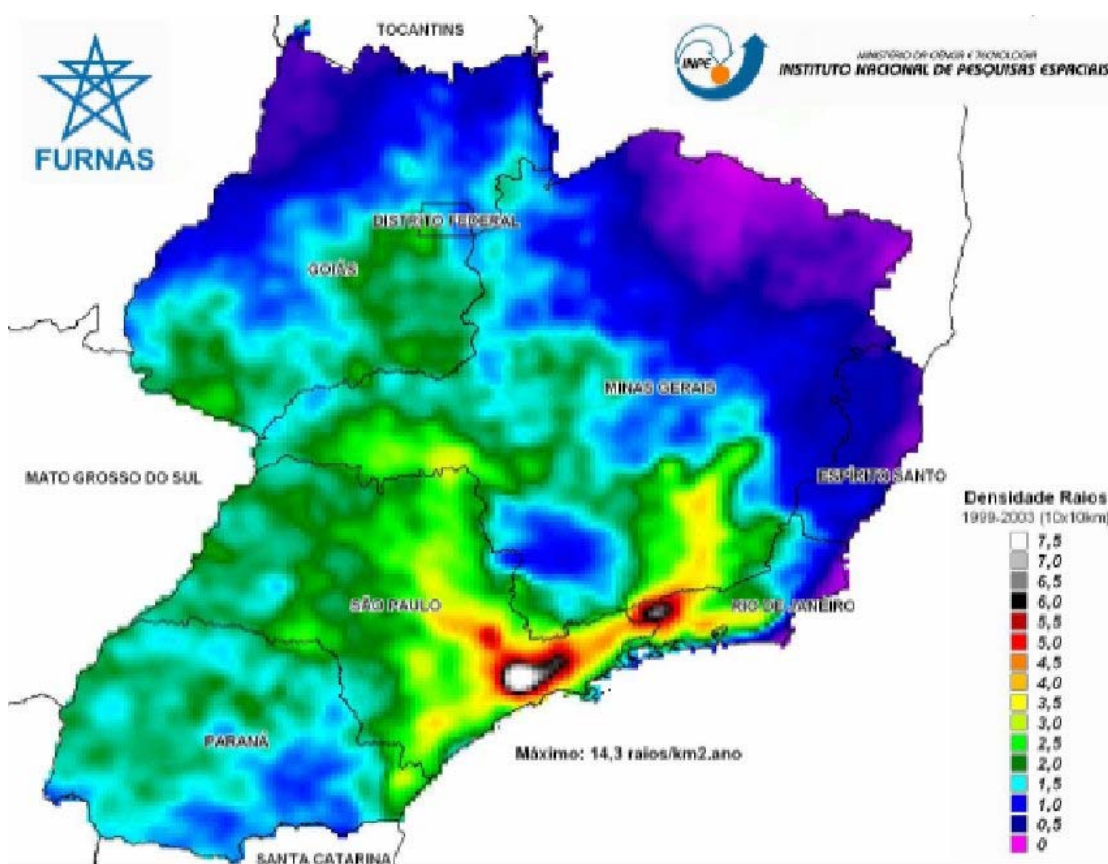


Figura 2.4 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas da RINDAT, referente ao período de 1999 a 2003, fornecido por FURNAS.

O sistema atual abrange apenas cerca de 1/3 do país, mas a expansão prevê a cobertura de uma área equivalente a 2/3 do território nacional (inserindo completamente as regiões Sul e Centro-Oeste).

Contudo, o recente tempo de operação da RINDAT não é capaz de fornecer uma base de dados segura para se definir informações estatísticas a respeito de variáveis atmosféricas. Além disso, o mais agravante é que os resultados obtidos vêm confirmando certas limitações do sistema adotado, principalmente no que se refere metodologia utilizada para se localizar, medir e quantificar as descargas. Isto será tratado mais detalhadamente no Item 4.2.1, sendo também apresentada uma análise comparativa entre o número de descargas determinado a partir do mapeamento do nível cerâmico, indicado na Figura 2.2, com o obtido através do levantamento da RINDAT.

Como grande parte das pesquisas e estudos relacionados a descargas atmosféricas nas décadas anteriores foram conduzidas sob análise cuidadosa e criteriosa, têm-se parâmetros estatísticos razoavelmente bem definidos [42,43]. No Capítulo 4 são avaliados, com maior ênfase, a densidade e as principais características do impulso.

2.3 INCIDÊNCIA NAS INSTALAÇÕES

De acordo com históricos de operação e trabalhos relacionados, as descargas atmosféricas que incidem em subestações (ou instalações próximas conectadas às mesmas) ocorrem na mesma ordem de grandeza dos curtos-circuitos à frequência industrial que apresentam elevadas correntes injetadas no solo, por normalmente serem suas precursoras.

Por outro lado, em se tratando de linhas de transmissão, os cabos pára-raios são projetados para blindar as fases contra a incidência direta de descargas. Ao serem captadas por esses cabos, elas se propagam pelos mesmos e pelas estruturas atingindo os respectivos sistemas de aterramento. Somente no caso de haver ruptura do isolamento entre a fase e o cabo pára-raios no vão ou entre a fase e a estrutura nas cadeias de isoladores ou janela da torre, é que ocorrerá um arco sustentado pela tensão do sistema, injetando no aterramento uma corrente a 60 Hz. Por isso, as correntes impulsivas injetadas no solo têm estatisticamente uma probabilidade maior de ocorrerem que as correntes injetadas a 60 Hz.

Dessa forma, no que se refere às solicitações transitórias, tanto os sistemas de aterramento de subestações como de estruturas de LT's estão fortemente sujeitos a correntes impulsivas originadas pelos surtos atmosféricos, que são caracterizadas geralmente por apresentar

valores de pico muito superiores às correntes à frequência industrial devido aos curtos-circuitos.

A caracterização estatística das descargas e os modelos físicos capazes de determinar os índices probabilísticos de incidência em instalações são tratados mais detalhadamente no Capítulo 4.

2.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO

Quanto às propriedades físicas dos solos tipicamente encontrados no Brasil, eles apresentam em geral elevados valores de resistividade à frequência industrial. Este comportamento dificulta a obtenção de baixos valores de impedância para os sistemas de aterramento e implica em maiores tensões induzidas no solo, conforme será estudado no Capítulo 3.

Para determinar o desempenho dos sistemas de aterramento sob solicitações transitórias, tipicamente provocadas por descargas atmosféricas, faz-se necessário obter a resposta dos mesmos para frequências de no mínimo 1 a 2 MHz. Como as características elétricas do solo influenciam de forma significativa no comportamento do aterramento e os parâmetros condutividade (σ) e permissividade (ϵ) são fortemente dependentes da frequência, é imprescindível que a modelagem do solo seja representativa e fisicamente coerente com esta dependência.

No que se refere à permeabilidade magnética, excetuando-se as regiões onde existem materiais ferromagnéticos, os solos tipicamente apresentam um valor constante e próximo à permeabilidade magnética no vácuo: $\mu_{solo} = \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ H/m.

Na análise dos aterramentos a 60 Hz, observa-se que o solo apresenta um comportamento basicamente resistivo, ou seja, a sua característica dielétrica ($\omega\epsilon$) pode ser desprezada perante a condutividade (σ). Extrapolar este tipo de modelagem para frequências de ordens superiores, ou mesmo não admitir a dependência destes parâmetros em função da frequência, representa uma hipótese não realista.

Dessa forma, é de fundamental importância que o modelo do solo seja determinado a partir de resultados de ensaios de campo. As medições para obtenção de σ e $\omega\epsilon$ devem ser realizadas em amostras de solo, considerando diferentes frequências dentro da faixa de interesse. No Capítulo 5 são apresentados em maiores detalhes os procedimentos experimentais a respeito destas medições.

Contudo, os valores obtidos nos ensaios devem ser analisados cuidadosamente, pois a aplicação direta de critérios de minimização puramente matemáticos para interpolar funções que melhor se ajustem aos pontos medidos nos ensaios fatalmente conduz a uma modelagem que não satisfaz os fenômenos eletromagnéticos associados à propagação no solo.

A princípio, o comportamento dos parâmetros do solo até 2 MHz pode ser expresso por funções do tipo:

$$\begin{aligned}\sigma &= a + b \cdot \omega^\alpha \\ \omega\epsilon &= c \cdot \omega^\alpha\end{aligned}$$

sendo a , b , c e α constantes e independentes da frequência.

No entanto, em determinados tipos de solo este comportamento pode não ser representativo para frequências superiores a centenas de kHz. Estudos anteriores [5-7], baseados em medições realizadas em 68 amostras coletadas de locais distintos e de diferentes tipos de solo, indicaram ser mais coerente utilizar um modelo físico baseado numa admitância \mathbb{W} , do tipo $\sigma + j\omega\epsilon$, composta por um somatório de admitâncias com diferentes comportamentos com a frequência, podendo cada uma delas ser definida a partir de funções de até quatro parâmetros independentes.

Com base nos resultados obtidos das diferentes amostras, considerando o espectro de interesse, [5-8] indica ser suficiente estimar o comportamento do solo a partir de apenas duas diferentes funções, uma constante e outra dependente da frequência. Dessa forma, as características elétricas do solo em função da frequência podem ser definidas a partir de três parâmetros estatisticamente independentes σ_0 , Δ_i e α de acordo com expressão:

$$W(f) = \sigma + j\omega\varepsilon = \sigma_0 + \Delta_i \cdot \left(\cot \text{ang} \left(\frac{\pi}{2} \alpha \right) + j \right) \cdot (f \cdot 10^{-6})^\alpha \quad \text{Equação 2-1}$$

onde : σ_0 – condutividade do solo em baixas frequências (100 Hz), S/m;

Δ_i – variação de $\omega\varepsilon$ entre 1 MHz e baixas frequências (100 Hz), S/m;

α – parâmetro que determina a dependência de W em função da frequência;

f – frequência, Hz.

Através da análise probabilística das amostras de solo [5-8], observa-se que a parcela constante e parcela dependente da frequência são estatisticamente independentes e que nesta última há correlação entre os comportamentos das partes real e imaginária. Apesar da forte variabilidade do comportamento da condutividade em baixas frequências com relação ao tipo de solo e às condições físicas do meio, conforme apresentado também em [9], em altas frequências esta dependência não é caracterizada.

Os resultados destes estudos ([5-8]) indicam que o fenômeno físico da condutividade do solo em altas frequências está fortemente associado a um processo dissipativo devido às características dielétricas do meio, diferentemente do processo de condução em baixas frequências (da ordem de 60 Hz) que se caracteriza por ser basicamente eletrolítico.

Sabendo que a resistividade do solo brasileiro (em baixas frequências) pode se situar desde poucas dezenas até valores superiores a 50.000 Ω .m, tendo um valor mediano caracterizado por 1000 Ω .m, e analisando estudos estatísticos aplicados a medições realizadas em diferentes tipos de solo [5-8], têm-se os seguintes parâmetros medianos para a função W e o respectivo gráfico do comportamento elétrico do solo com a frequência (100 Hz a 2 MHz).

$$\sigma_0 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ S/m};$$

$$\Delta_i = 11,7 \times 10^{-3} \text{ S/m};$$

$$\alpha = 0,7.$$

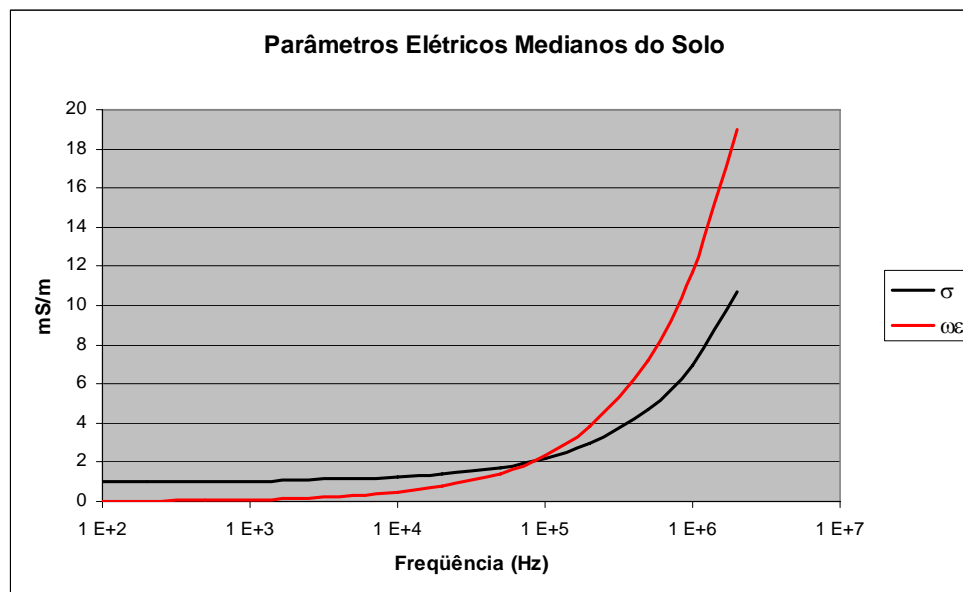


Figura 2.5 – Parâmetros elétricos σ e $\omega\epsilon$ do solo em função da frequência.

Como a obtenção do comportamento do solo exige um laborioso e cuidadoso procedimento de medição, é comum analisar poucas amostras do solo por região de interesse. Por isso, a utilização da análise probabilística [6-7] para estimar os parâmetros da função W se revela uma ferramenta bastante útil na modelagem.

Por outro lado, como a condutividade do solo para 100 Hz apresenta uma maior variabilidade com relação a algumas características físicas do solo (como tipo e umidade) e o processo para medição da resistividade em baixas frequências é bastante simples, convém que sejam realizados vários ensaios deste tipo em diferentes pontos na região de interesse a fim de assegurar a definição deste parâmetro na função.

2.5 ATERRAMENTO DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Estes sistemas de aterramento são comumente instalados em uma disposição radial, sendo compostos por cabos de cobre, aço cobreado ou aço zincado¹, e denominados de *cabos*

¹ Cumpre observar que este tipo de cabo não é adequado, principalmente para regiões com solo de baixa resistividade ou de acidez elevada, pois a corrosão galvânica pode comprometer a integridade dos cabos.

contrapeso. As configurações típicas utilizadas tanto em estruturas autoportantes como estaiadas são mostradas nas figuras a seguir.

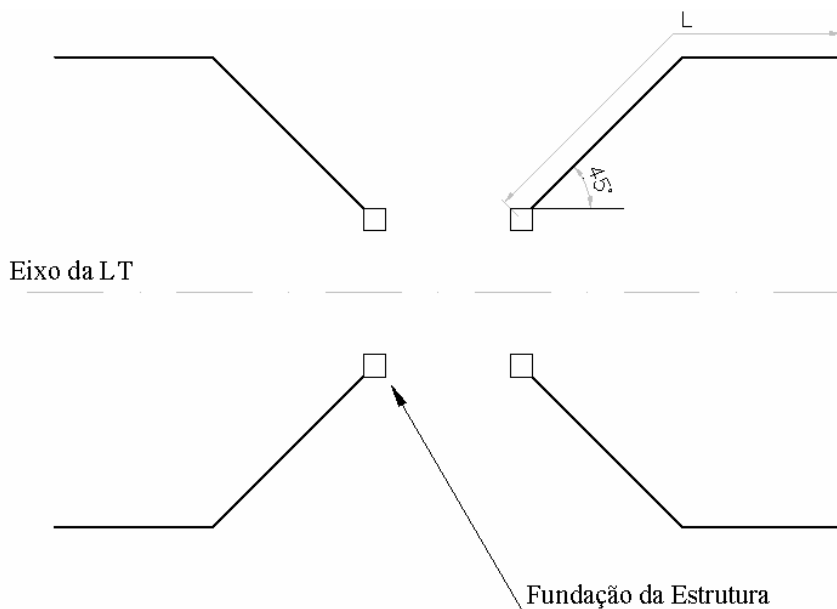


Figura 2.6 – Configuração do aterramento comumente utilizado em estruturas autoportantes.

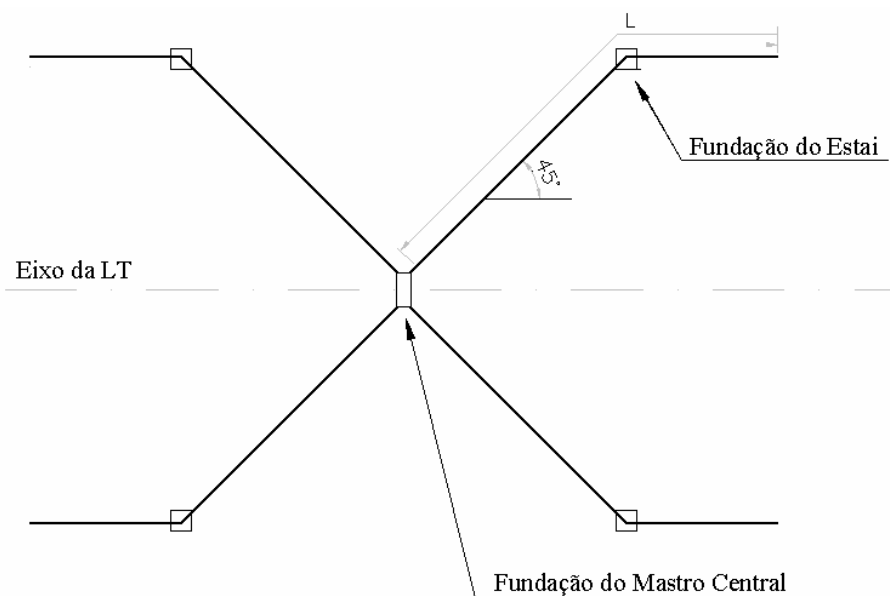


Figura 2.7 – Configuração do aterramento comumente utilizado em estruturas estaiadas.

De acordo com procedimentos construtivos usualmente empregados, o comprimento L de cada cabo é variável e depende da resistividade do solo onde se encontra instalada a estrutura. O critério normalmente utilizado para se determinar este comprimento está

baseado no comportamento do sistema de aterramento a 60 Hz, sendo estabelecido um valor máximo de resistência de aterramento a ser atendido (tipicamente 20 Ω). Como já mencionado anteriormente, este é um procedimento inadequado e não avalia condições importantes como a segurança de pessoas na vizinhança da estrutura e o desempenho transitório.

Quanto à profundidade de instalação dos cabos, eles normalmente são enterrados a uma profundidade média entre 30 e 80 cm, sendo mais comum adotar-se 50 cm. Contudo, em solos sujeitos à agricultura cultivada, recomenda-se instalá-los a 1 m.

Como pode ser observado na Figura 2.7, em se tratando de estruturas estaiadas, os cabos contrapeso, que saem do mastro central, são conectados aos estais junto às suas fundações.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Na época em que as dimensões, o custo e as limitações de processamento dos computadores digitais constituíam barreiras à disseminação do uso desta tecnologia, os modelos físicos e as metodologias de cálculo empregados em diversas áreas de conhecimento precisavam sofrer profundas simplificações e aproximações para que pudessem ser implementados e utilizados como ferramentas de aplicação prática. Por isso, os erros associados a estes procedimentos, por vezes, produziam resultados pouco precisos e de confiabilidade duvidosa.

No entanto, a crescente revolução tecnológica permitiu que se reduzissem os custos de produção e, concomitantemente, fosse aumentada a capacidade de processamento dos microcomputadores, contribuindo de forma contínua para a melhoria e a popularização destes equipamentos. Com isso, os recursos computacionais, outrora escassos, passaram a se tornar cada vez mais acessíveis tanto para a comunidade científica como para os profissionais ligados à pesquisa, impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias, de modelagens mais eficientes e confiáveis e de processos matemáticos mais rápidos e precisos.

Em se tratando de estudos aplicados a sistemas de aterramento não foi diferente. Metodologias computacionais mais coerentes foram sendo desenvolvidas e aprimoradas, substituindo os processos analíticos e empíricos, que eram baseados em equações simplistas obtidas a partir de resultados experimentais. Os primeiros modelos computacionais a apresentar resultados eficazes e robustos tratavam somente do desempenho à frequência industrial, devido à maior facilidade em se representar os fenômenos eletromagnéticos associados a baixas frequências. Contudo, mais recentemente muitos trabalhos têm estudado o comportamento transitório dos aterramentos, sendo definidas diferentes topologias e procedimentos de análise.

No item a seguir são apresentados os conceitos fundamentais empregados nas principais modelagens utilizadas, fazendo-se uma abordagem específica da metodologia adotada neste trabalho. Por sua vez, um critério de extrema importância na avaliação dos aterramentos diz respeito aos riscos associados à segurança de pessoas. Este assunto é tratado no Item 3.2, sendo considerado o caráter probabilístico do atendimento às condições toleráveis pelo corpo humano.

3.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1.1 ASPECTOS GERAIS

O estudo do comportamento de condutores enterrados no solo teve seus alicerces fundamentados em ensaios e formulações apresentadas em [10-13]. Por sua vez, em [14-15] foram introduzidos os conceitos de propagação de correntes impulsivas em meios dissipativos.

Os primeiros algoritmos computacionais a obterem resultados satisfatórios foram propostos para a análise dos sistemas de aterramento à frequência industrial, sendo apresentado em [16-17] a metodologia mais difundida e utilizada, que trata com rigor físico os acoplamentos entre os condutores e as tensões induzidas no solo, considerando também a influência da heterogeneidade do solo através de camadas de diferentes resistividades. Em [9] é realizada uma abordagem teórica das modelagens físicas empregadas e dos aspectos computacionais envolvidos nos cálculos, incluindo também a avaliação dos critérios de segurança de pessoas e os aspectos experimentais relativos a ensaios de campo.

Devido à maior complexidade da modelagem dos fenômenos eletromagnéticos associados às correntes de natureza transitória, este tipo de análise foi tratado de forma menos efetiva que o comportamento a 60 Hz, cuja metodologia já estava completamente definida ao final da década de 70. No entanto, o desempenho transitório dos sistemas de aterramento vem se tornando tema de muitos trabalhos e pesquisas, tendo sido apresentado resultados consistentes a partir do final da década de 80.

Existem basicamente três metodologias que são diferenciadas de acordo com a teoria utilizada para modelar os condutores: circuitos equivalentes, linhas de transmissão e campos eletromagnéticos. Em todas, os condutores do sistema de aterramento são subdivididos em segmentos, sendo tratados de forma distinta em cada uma delas.

Os métodos baseados na teoria de circuitos [19-21] utilizam a aproximação dos segmentos por circuitos elétricos equivalentes do tipo R-L-C, sendo estes parâmetros calculados através de equações clássicas sem considerar os efeitos da propagação e desprezando os acoplamentos entre condutores. A solução é obtida no domínio do tempo através das equações diferenciais. Em [22] é apresentada uma nova abordagem desta metodologia considerando a dependência dos parâmetros com a frequência, a representação aproximada do efeito de propagação e os acoplamentos resistivos, capacitivos e indutivos entre segmentos. O sistema de aterramento é analisado no domínio da frequência através de um sistema de equações nodais, sendo a resposta no domínio do tempo obtida pela Transformada Inversa de Fourier.

Por sua vez, em [22-27] é apresentada uma outra modelagem que se baseia na aplicação das equações características de linhas de transmissão aos segmentos de condutor, considerando parâmetros elétricos distribuídos e o efeito do solo como um meio dissipativo. A análise é desenvolvida através das equações no domínio tempo/frequência utilizando soluções de ondas trafegantes usualmente empregadas em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos EMTP/ATP. A facilidade é que neste caso podem ser utilizadas interfaces que permitem o uso destes simuladores e, conseqüentemente, a inclusão de outros elementos de sistema para a simulação.

Contudo, ambas as metodologias anteriormente apresentadas destacam-se por seus procedimentos de cálculo não exigirem muito processamento computacional e serem deficitárias para determinar corretamente o comportamento transitório dos sistemas de aterramento, devido aos erros de aproximações em altas frequências. Enquanto a primeira apresenta limitações na representação adequada do efeito de propagação, a segunda não é capaz de determinar corretamente os acoplamentos eletromagnéticos entre segmentos e nem permite o cálculo das tensões induzidas no solo.

A metodologia mais adequada e que apresenta maior rigor físico são as desenvolvidas a partir das equações de Maxwell, definindo os campos eletromagnéticos associados aos segmentos de condutor. Em [28-31], os condutores são modelados por dipólos elétricos, sendo os campos elétricos e magnéticos determinados a partir dos vetores potenciais de Hertz e das Integrais de Sommerfeld. Devido às dificuldades inerentes ao cálculo destas integrais, optou-se neste trabalho por utilizar a metodologia desenvolvida em [5,8,32,33], que também adota a modelagem através dos dipólos, só que determina a solução através de ondas esféricas considerando a aproximação por fontes elementares de corrente transversal e longitudinal.

3.1.2 METODOLOGIA ADOTADA

Conforme apresentado no Anexo A, os campos eletromagnéticos e os potenciais escalar e vetor num meio homogêneo e isotrópico (Equações A.8 a A.12) relacionados a fontes pontuais de injeção de corrente e fontes filamentosas de corrente são obtidos a partir das funções de Bessel em coordenadas esféricas, incluindo também o efeito da propagação no meio em causa.

Os condutores do sistema de aterramento são subdivididos em segmentos. Por isso, numa condição limite associada basicamente ao comprimento dos segmentos (a) e ao coeficiente de propagação do meio (k), de forma que $|k \cdot a| \ll 1$ e que ao longo dos segmentos seja considerada uma variação desprezível do campo eletromagnético, pode-se representar os elementos infinitesimais de segmento através do modelo indicado anteriormente, caracterizado pelas fontes elementares de corrente transversal e longitudinal. Por sua vez, os campos e os potenciais escalar e vetor associados aos segmentos são obtidos a partir da integração das equações aplicadas aos elementos infinitesimais.

O pressuposto de se adotar $|k \cdot a| \ll 1$ e uma variação desprezível dos campos ao longo de cada segmento, permitem considerar um modelo composto por uma injeção de corrente no solo uniformemente distribuída e uma corrente longitudinal uniforme, conforme será tratado nos itens que se seguem.

Cumpra observar que o coeficiente de propagação (k) é determinado pela frequência de pulsação do campo eletromagnético senoidal $\omega = 2 \cdot \pi f$ (representado na forma complexa por $e^{\mp i \omega t}$) e pelos parâmetros elétricos do solo, de acordo com a expressão a seguir:

$$k = \sqrt{\mu \varepsilon \omega^2 \pm i \omega \mu \sigma} \quad \text{Equação 3-1}$$

sendo: μ - permeabilidade magnética do solo;

ε - permissividade elétrica do solo;

σ - condutividade elétrica do solo.

A metodologia consiste em se determinar, no domínio da frequência, os acoplamentos próprios e mútuos entre segmentos e conseqüentemente as correntes transversais e longitudinais dos mesmos, tendo como resultado concreto para o sistema de aterramento as impedâncias e as tensões transversais em diferentes pontos de interesse, bem como as tensões induzidas em cabos isolados e na superfície do solo.

Freqüentemente alguns trabalhos [21, 28], dentre outros, apresentam incorretamente como resultado a “impedância de impulso” do sistema de aterramento em função do tempo. Contudo, o conceito de impedância só está associado ao domínio da frequência. Por isso, o que será determinado no domínio do tempo são as tensões mencionadas anteriormente, que são obtidas através da Integral Inversa de Fourier.

Acoplamentos Transversais e Longitudinais entre Segmentos

O acoplamento entre dois segmentos de condutor está associado ao efeito do campo eletromagnético produzido por um segmento em outro segmento. Contudo, considerando uma aproximação em que possam ser analisados separadamente os campos transversais e longitudinais associados ao modelo do dipolo elétrico adotado, representado através de fontes de corrente transversais e longitudinais, é possível expressar estes campos através dos potenciais escalar e vetor, respectivamente. Conforme apresentado no Anexo A, os potenciais escolhidos para definir os campos eletromagnéticos correspondem aos potenciais de Lorentz, por terem formulação semelhante aos referidos campos.

O acoplamento transversal pode ser determinado a partir do potencial escalar médio induzido ao longo de um segmento, originado pela corrente injetada no meio através de outro segmento (ou dele próprio, no caso do acoplamento próprio). Por sua vez, o acoplamento longitudinal é obtido através da tensão induzida num segmento devido à corrente longitudinal em outro segmento (ou nele próprio, no caso do acoplamento próprio).

De forma a facilitar a obtenção das equações, no diagrama esquemático da figura a seguir são apresentados dois segmentos (1 e 2), de comprimentos L_1 e L_2 , respectivamente, e imersos num solo representado por meio linear, homogêneo e isotrópico caracterizado por um coeficiente de propagação k , obtido conforme Equação 3-1. Encontram-se destacados os elementos infinitesimais de cada segmento, dl_1 e dl_2 , nos quais serão aplicadas as equações associadas a fontes elementares, de acordo com o Anexo A. A distância entre esses elementos é indicada através de \vec{r} .

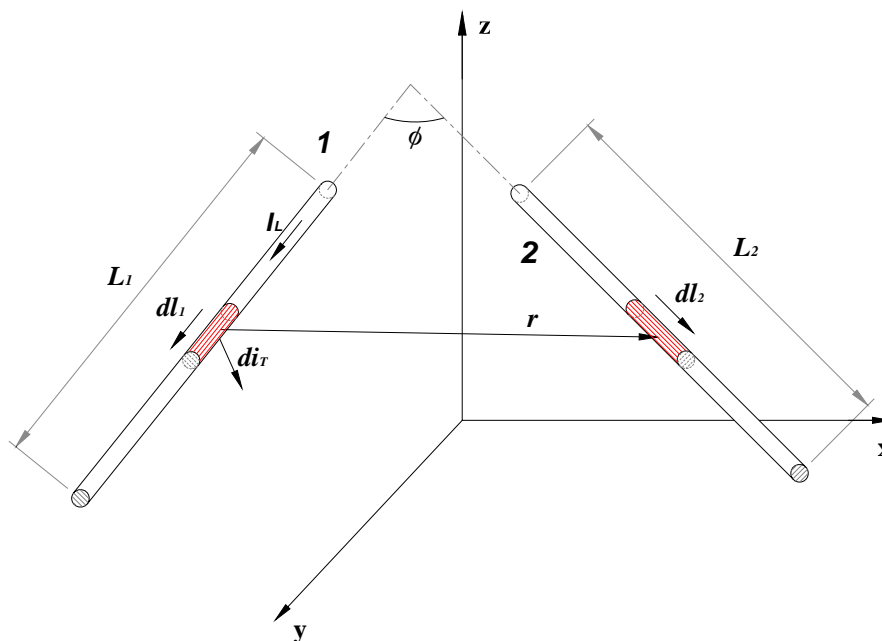


Figura 3.1 – Diagrama para exemplificar a aplicação das equações eletromagnéticas aos segmentos.

Para exemplificar, serão determinados os acoplamentos, considerando as tensões induzidas no segmento 2 devido às correntes transversais I_T e longitudinais I_L no segmento 1, representadas por:

$$I_T = i_T e^{\mp i\omega t}$$

$$I_L = i_L e^{\mp i\omega t}$$

Definindo-se um comprimento máximo para os segmentos de modo que seja possível representar a corrente transversal como sendo uniformemente distribuída ao longo do mesmo, tem-se que para o segmento 1, de comprimento L_1 , a corrente transversal di_T em cada elemento infinitesimal dl_1 corresponde a:

$$di_T = \frac{I_T}{L_1} dl_1 = \frac{i_T e^{\bar{i}\omega t}}{L_1} dl_1$$

Por sua vez, sendo este comprimento de segmento também definido de modo que a corrente longitudinal possa ser representada como uniforme ao longo do seu comprimento, tem-se para o segmento 1 que a corrente longitudinal em cada elemento infinitesimal dl_1 é a própria I_L .

No que se refere ao acoplamento transversal o mesmo é obtido a partir da Equação A-8, que define o potencial escalar num ponto devido a uma fonte pontual de injeção de corrente num meio. Assim, tem-se que o potencial no elemento infinitesimal dl_2 do segmento 2, devido à corrente transversal uniformemente distribuída do segmento 1 (di_T), será obtido por integração:

$$U_{dl_2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot (\sigma \mp i\omega\epsilon)} \int \frac{e^{ikr}}{r} di_T = \frac{i_T e^{\bar{i}\omega t}}{4 \cdot \pi \cdot L_1 \cdot (\sigma \mp i\omega\epsilon)} \int_0^{L_1} \frac{e^{ikr}}{r} dl_1 \quad \text{Equação 3-2}$$

onde: U_{dl_2} - potencial escalar induzido no elemento dl_2 ;
 $i_T e^{\bar{i}\omega t}$ - corrente transversal total injetada no solo pelo segmento 1;
 $\sigma, \omega\epsilon$ - parâmetros elétricos do solo (obtidos conforme Item 2.4).

Dessa forma, determina-se o potencial escalar médio induzido ao longo do segmento 2 (U_2) a partir da integração da equação anterior ao longo do seu comprimento:

$$U_2 = \frac{1}{L_2} \int_0^{L_2} U_{dl_2} dl_2 = \frac{i_T e^{\bar{i}\omega t}}{4 \cdot \pi \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (\sigma \mp i\omega\epsilon)} \int_0^{L_2} \int_0^{L_1} \frac{e^{ikr}}{r} dl_1 dl_2$$

De acordo com [32,33], ao definir-se o comprimento máximo “L” para os segmentos, de forma que $|k \cdot L| \ll 1$ (ou que se possa valer as condições de uniformidade adotadas para as

correntes transversal e longitudinal dos segmentos) e que as distâncias entre eles seja muito maior que o raio dos condutores, pode-se utilizar a seguinte aproximação na equação anterior:

$$e^{ik\eta} \cong e^{ikr}$$

onde η corresponde à distância entre os pontos medianos de dois segmentos.

Assim, a expressão para o cálculo do potencial médio induzido ao longo de um segmento pode ser simplificada com a retirada do termo e^{ikr} do integrando.

Em se tratando do acoplamento devido à corrente longitudinal dos segmentos, o mesmo será determinado de modo análogo ao apresentado anteriormente, só que a partir da expressão do campo elétrico associado a uma corrente percorrendo um elemento de comprimento dl , apresentada na Equação A-12. Observando o diagrama da Figura 3.1, o campo elétrico no elemento infinitesimal dl_2 do segmento 2, considerando uma corrente longitudinal uniforme I_L ao longo do segmento 1, será obtida por integração de acordo com:

$$\vec{E}_{dl_2} = \pm \frac{i \cdot \omega \cdot \mu \cdot i_L \cdot e^{\mp i\omega t}}{4 \cdot \pi} \left(\int_0^{L_1} \frac{e^{ikr}}{r} dl_1 \right) d\vec{l}_1$$

onde: \vec{E}_{dl_2} - campo elétrico (com direção e sentido de $d\vec{l}_1$) sob o elemento infinitesimal dl_2 no segmento 2;

$i_L e^{\mp i\omega t}$ - corrente longitudinal que circula pelo segmento 1;

μ - permeabilidade magnética do solo ($4 \pi \times 10^{-7}$ H/m, conforme Item 2.4).

A tensão longitudinal induzida sob o segmento 2 será obtida pela integração da equação anterior:

$$V_2 = \int_0^{L_2} \vec{E}_{dl_2} \cdot d\vec{l}_2 = \pm \frac{i \cdot \omega \cdot \mu \cdot i_L \cdot e^{\mp i\omega t} \cos(\phi)}{4 \cdot \pi} \int_0^{L_2} \int_0^{L_1} \frac{e^{ikr}}{r} dl_1 dl_2 \quad \text{Equação 3-3}$$

onde: V_2 - tensão longitudinal induzida sob o segmento 2;

ϕ - ângulo formado entre os segmentos 1 e 2.

Adotando-se o mesmo procedimento apresentado anteriormente, a respeito do comprimento dos segmentos, pode-se retirar o termo e^{ikr} do integrando, simplificando a integração.

Dessa forma, as impedâncias transversais próprias e mútuas associadas aos campos eletromagnéticos externos ao condutor são obtidas pela razão entre o potencial escalar médio induzido nos segmentos e as correspondentes correntes transversais injetadas no solo. Por sua vez, as impedâncias longitudinais próprias e mútuas associadas ao campo eletromagnético externo correspondem à razão entre as tensões longitudinais induzidas pelas respectivas correntes longitudinais que as produziram. Dessa forma, tem-se:

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{e^{ik\eta}}{4 \cdot \pi \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (\sigma \mp i\omega\epsilon)} \cdot \beta \\ Z_L &= \frac{j \cdot \omega \cdot \mu \cdot e^{ik\eta} \cos(\phi)}{4 \cdot \pi} \cdot \beta \\ \beta &= \int_0^{L_2} \int_0^{L_1} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 \end{aligned} \quad \text{Equação 3-4}$$

onde ϕ é o ângulo formado entre os segmentos.

A impedância interna associada ao efeito do campo eletromagnético interno ao condutor pode ser calculada conforme [33], de acordo com:

$$Z_{int} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_1}{\sigma_1}} \frac{1}{2\pi r_1} \frac{I_0(r_1 \sqrt{i\omega\mu_1 \sigma_1})}{I_1(r_1 \sqrt{i\omega\mu_1 \sigma_1})}$$

sendo: r_1 - raio do condutor;

μ_1 - permeabilidade magnética do condutor;

σ_1 - condutividade elétrica do condutor;

I_0, I_1 - funções modificadas de Bessel de 1ª espécie de ordem 0 e 1, respectivamente.

A separação entre impedância interna e externa de um condutor é um artifício que pode ser aplicado quando o meio externo apresenta condutividade desprezível frente à do condutor. Com isso, é possível determinar a impedância externa a partir dos campos externos ao

condutor, considerando o mesmo como sendo ideal (com condutividade infinita) e o meio externo sendo representado através das correspondentes propriedades físicas realistas (ϵ , μ , σ e ϵ). Por outro lado, permite definir a impedância interna a partir dos campos internos ao condutor desprezando-se o efeito do meio externo e modelando o condutor através de suas propriedades físicas realistas (μ e σ).

Dessa forma às impedâncias longitudinais próprias de cada segmento deverão ser somadas as impedâncias internas Z_{int} de cada segmento, definidas conforme equação anterior.

Relações entre Tensões e Correntes nos Segmentos

Uma vez determinadas estas impedâncias, há de se analisar as conexões existentes entre os segmentos do sistema de aterramento para estabelecer as relações que irão compor o sistema matricial a ser resolvido. Para uma melhor visualização, na figura a seguir estão indicadas as correntes e as tensões a serem tratadas em cada segmento (V_J , U_J e I_L), bem como os nós 1 e 2 e as correspondentes grandezas (V_1 , V_2 , I_1 e I_2).

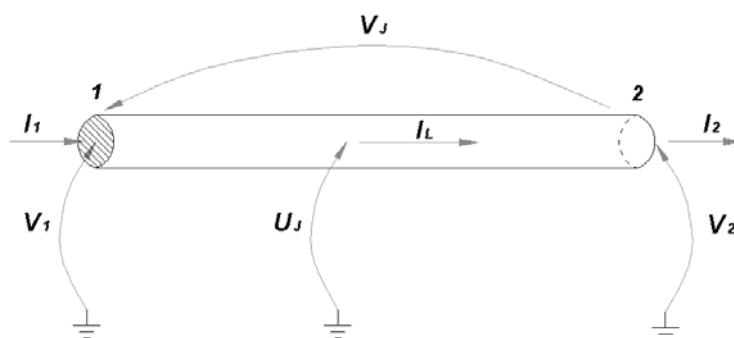


Figura 3.2 – Correntes e tensões nos segmentos.

No que se refere à corrente longitudinal I_L , considera-se que a mesma seja uniforme ao longo de cada segmento, como já mencionado no item anterior, e por conseguinte corresponda ao valor médio entre a corrente injetada no segmento pelo nó 1 (I_1) e a corrente drenada pelo nó 2 (I_2). Assim:

$$I_L = \frac{I_1 + I_2}{2} \tag{Equação 3-5}$$

Por sua vez, como é considerado que a corrente transversal I_T injetada no solo pelo segmento seja uniformemente distribuída ao longo do seu comprimento, conforme item anterior, pode-se determiná-la a partir das correntes dos nós através de:

$$I_T = I_1 - I_2 \quad \text{Equação 3-6}$$

Definindo-se as tensões V_1 e V_2 em cada nó do segmento como a tensão em relação a um ponto infinitamente afastado (terra remota), tem-se que a tensão média do segmento (U_J) com relação a um ponto muito afastado está associada às tensões dos nós de acordo com a equação a seguir:

$$U_J = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{Equação 3-7}$$

Por sua vez, a tensão longitudinal induzida em cada segmento (V_J) esta relacionada às tensões dos nós terminais (V_1 e V_2) através de:

$$V_J = V_1 - V_2 \quad \text{Equação 3-8}$$

A análise das correntes injetadas e drenadas nos segmentos pelos nós será tratada com o auxílio da figura a seguir:

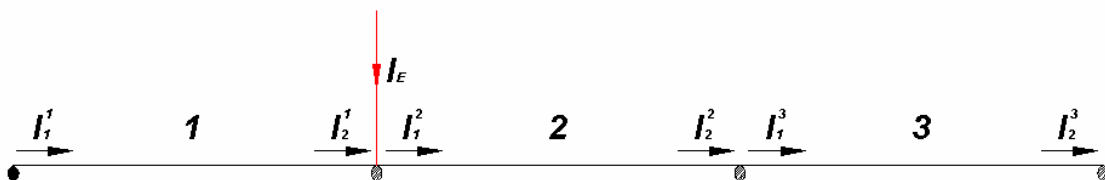


Figura 3.3 – Relação entre as correntes injetadas e drenadas nos segmentos.

Definindo a corrente I_E como uma fonte de corrente externa aplicada em um determinado nó, tem-se a seguinte relação entre as correntes I_1 e I_2 nos terminais dos segmentos e a injetada através dos nós:

$$\begin{aligned} I_1^1 &= 0 \\ I_1^2 - I_2^1 &= I_E \\ I_1^3 - I_2^2 &= 0 \\ -I_2^3 &= 0 \end{aligned} \quad \text{Equação 3-9}$$

As relações estabelecidas através das equações 3-5 a 3-9 revelam como serão tratadas as tensões e as correntes associadas aos nós em função das tensões e correntes nos segmentos. Elas são extremamente importantes, pois as equações que determinam os acoplamentos são todas definidas para as grandezas referidas aos segmentos.

Sistema Matricial

O sistema matricial a seguir apresenta as equações referentes aos acoplamentos transversais e longitudinais entre segmentos, determinando as relações das tensões transversais $[U_J]$ e longitudinais $[V_J]$ com as respectivas correntes transversais $[I_T]$ e longitudinais $[I_L]$. Analisando um sistema de aterramento subdividido em M segmentos, ter-se-ia:

$$\begin{aligned} [V_J]_M &= [Z_L]_{M \times M} \cdot [I_L]_M \\ [U_J]_M &= [Z_T]_{M \times M} \cdot [I_T]_M \end{aligned} \quad \text{Equação 3-10}$$

Os elementos próprios e mútuos das matrizes de impedâncias longitudinais ($[Z_L]$) e transversais ($[Z_T]$) são obtidas de acordo com a Equação 3-4.

As equações que interagem as correntes e tensões entre nós e segmentos, apresentadas no item anterior, são aplicadas ao referido sistema matricial através das matrizes $[K]$, $[Inc]$, $[C]$ e $[D]$, a seguir apresentadas. Para esta análise, admite-se que a subdivisão do sistema de aterramento em M segmentos produza N nós.

A partir da relação estabelecida na Equação 3-7, obtém-se a matriz $[K]_{M \times N}$, matriz de conectividade cujos elementos são obtidos pela seguinte lei de formação:

$$\begin{aligned} k_{mn} &= 1/2, \text{ se o nó } n \text{ for conectado ao segmento } m; \\ k_{mn} &= 0, \text{ se não houver conexão entre nó } n \text{ e segmento } m. \end{aligned}$$

Por outro lado, a matriz de incidência $[Inc]_{M \times N}$ é regida pela Equação 3-8, sendo seus elementos definidos por:

$$\begin{aligned} I_{mn} &= 1, \text{ para o nó } n \text{ conectado no início do segmento } m; \\ I_{mn} &= -1, \text{ para o nó } n \text{ conectado no fim do segmento } m; \\ I_{mn} &= 0, \text{ se não houver conexão entre nó } n \text{ e segmento } m. \end{aligned}$$

As matrizes $[C]_{N \times M}$ e $[D]_{N \times M}$ são definidas pela relação apresentada em Equação 3-9, sendo seus elementos definidos por:

$$C_{nm} = 1, \text{ para o nó } n \text{ conectado no início do segmento } m;$$

$$C_{nm} = 0, \text{ para os demais elementos;}$$

$$D_{mn} = -1, \text{ para o nó } n \text{ conectado no fim do segmento } m;$$

$$D_{mn} = 0, \text{ para os demais elementos.}$$

Analisando as matrizes anteriormente definidas e a matriz $[Inc]_{M \times N}$, pode-se observar que:

$$([C]_{N \times M} + [D]_{N \times M})^T = [Inc]_{M \times N}$$

Contudo, apesar da aparente redundância, elas serão extremamente úteis para se obter a solução do sistema global.

Dessa forma aplicando as relações estabelecidas em 3-5 a 3-9, através das matrizes $[K]_{M \times N}$, $[Inc]_{M \times N}$, $[C]_{N \times M}$ e $[D]_{N \times M}$, ao sistema Equação 3-10, tem-se:

$$\begin{aligned} [Inc]_{M \times N} \cdot [U_k]_N &= [Z_L]_{M \times M} \cdot ([I_1]_M + [I_2]_M) / 2 \\ [K]_{M \times N} \cdot [U_k]_N &= [Z_T]_{M \times M} \cdot ([I_1]_M - [I_2]_M) \\ [C]_{N \times M} \cdot [I_1]_M + [D]_{N \times M} \cdot [I_2]_M &= [I_E]_N \end{aligned} \quad \text{Equação 3-11}$$

Onde o vetor $[U_k]$ corresponde às tensões transversais em cada nó, o vetor $[I_E]$ às fontes de corrente externas injetadas em um ou mais nós, o vetor $[I_j]$ às correntes injetadas nos segmentos pelos nós e $[I_2]$ às correntes que saem dos segmentos para os nós.

A solução deste sistema conduz à:

$$[U_k]_N = [Z_{eq}]_{N \times N} \cdot [I_E]_N \quad \text{Equação 3-12}$$

sendo a matriz $[Z_{eq}]$ definida por:

$$[Z_{eq}] = [K]^T_{N \times M} \cdot [Z_T]_{M \times M}^{-1} \cdot [K]_{M \times N} + [Inc]^T_{N \times M} \cdot [Z_L]_{M \times M}^{-1} \cdot [Inc]_{M \times N} \quad \text{Equação 3-13}$$

A partir do cálculo das tensões $[U_k]$ em cada nó do aterramento, determinam-se as correntes longitudinais $[I_L]$ e transversais $[I_T]$ dos segmentos através do sistema apresentado na Equação 3-10.

As tensões induzidas na superfície do solo e as tensões longitudinais induzidas em cabos isolados são obtidos, respectivamente, a partir da Equação 3-2 e da Equação 3-3, considerando as correntes transversais e longitudinais calculadas. As induções são computadas independentemente para cada segmento, sendo o resultado global de todos os condutores do sistema de aterramento determinado através de superposição de cada uma dessas contribuições.

O efeito de meios com diferentes coeficientes de propagação é considerado através dos fenômenos de transmissão e reflexão nas interfaces de separação entre esses meios nos cálculos dos acoplamentos próprios e mútuos, de acordo com [33,53]. No Item A.6 é apresentado mais detalhadamente o tratamento do mesmo.

Considerações Gerais

A metodologia adotada consiste em se estabelecer e resolver o sistema matricial para cada frequência de interesse no espectro analisado, determinando-se todas as grandezas necessárias (tensões e impedâncias em pontos do sistema de aterramento e tensões induzidas solo). Este espectro é definido de acordo com a natureza da corrente que será injetada no aterramento, sendo utilizada a Integral de Fourier para decompor o sinal (no domínio do tempo) para o domínio da frequência através. Como já tratado nos capítulos anteriores, em se tratando da análise sob descargas atmosféricas, pode-se admitir uma representação para frequências da ordem de até 1 a 2 MHz.

Devido ao tempo de processamento necessário à resolução do sistema para cada frequência, torna-se imprescindível definir algumas frequências para as quais o sistema deverá ser resolvido, sendo a resposta em todo o espectro obtida através da interpolação dos resultados obtidos para estas frequências analisadas.

No programa desenvolvido são selecionadas 10 frequências por década desde 1Hz até 100kHz, sendo que entre 100kHz e 1MHz são analisadas 50 frequências. Após obter as respostas do sistema para estas frequências, determina-se o comportamento para todo

espectro através da interpolação de funções polinomiais de ordem 3 entre os pontos calculados. São definidas funções distintas para cada década, mantendo-se a continuidade entre elas ao final de cada década.

As respostas dos sinais no domínio do tempo são determinadas através da Integral Inversa de Fourier utilizando o comportamento das funções no domínio da frequência, obtido como mencionado anteriormente.

3.2 CONDIÇÕES ASSOCIADAS À SEGURANÇA DE PESSOAS

3.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Dentre os itens de avaliação de um sistema de aterramento, destacam-se os critérios quanto à segurança de pessoas e à proteção de equipamentos como os principais e mais criteriosos a serem atendidos, não somente pelos riscos relativos à integridade dos dispositivos e à saúde humana, mas também pelas incertezas associadas à metodologia para determinação dos parâmetros envolvidos.

No que se refere aos equipamentos, o desenvolvimento tecnológico vem impulsionando a utilização cada vez maior de circuitos digitais e automatizados em diversas aplicações nas mais variadas instalações (indústrias, estabelecimentos comerciais e residenciais, dentre outros), permitindo sofisticação e avanço em diversos segmentos, mas em contrapartida aumentando a sensibilidade a sinais de interferência. Mais especificamente no setor elétrico, a crescente digitalização dos circuitos de proteção e controle, indispensáveis para a melhoria do desempenho e da confiabilidade do sistema, vem tornando-os mais vulneráveis a perturbações de origem transitória se comparados aos instrumentos clássicos empregados no passado.

A arquitetura mais complexa e a topologia dos circuitos necessários à integração dos dispositivos digitais (tais como sensores, atuadores, conversores analógico/digital e etc.) são fatores que elevam a susceptibilidade a interferências externas, comumente provocadas por descargas atmosféricas ou surtos de manobra. Isto porque durante tais distúrbios podem ser induzidas tensões impulsivas em cabos de sinais e de alimentação, ou até mesmo

em determinados pontos do sistema de aterramento, capazes não só de danificar tais dispositivos como também, em casos mais severos, provocar a operação indevida de um elemento do sistema.

A análise destes efeitos é tratada no estudo de compatibilidade eletromagnética e vem se tornando objeto de interesse devido à crescente automação e digitalização dos processos nas subestações. Apesar da metodologia utilizada permitir determinar as tensões induzidas e as interferências associadas às correntes de natureza transitória, neste trabalho não serão avaliados os aspectos relativos a este assunto.

Por outro lado, no que diz respeito à segurança de pessoas, devem ser examinadas as situações mais prováveis de exposição ao risco e os critérios limitantes associados aos efeitos de correntes circulando pelo corpo. Estes assuntos serão tratados nos itens que se seguem.

3.2.2 CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO

Tipicamente as situações de exposição ocorrem para a condição de passo, que está associada à tensão aplicada entre os pés de um indivíduo, e de toque, referente à tensão entre os seus membros superiores e os pés. Há de se considerar também condição de transferência, relacionada à tensão induzida em cabos isolados ou do próprio aterramento que é transferida para um local remoto. Na figura a seguir encontram-se esquematizadas estas situações.

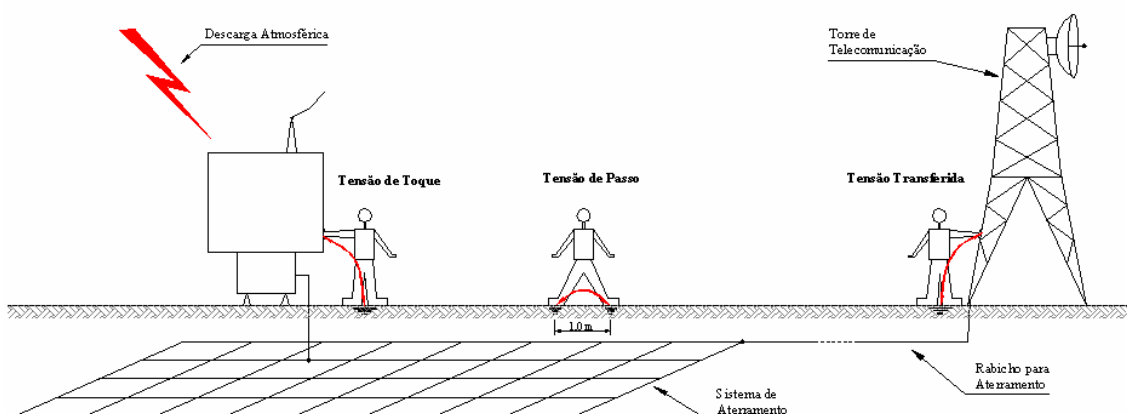


Figura 3.4 – Condições típicas de exposição às tensões de passo, de toque e transferida.

A *tensão de passo* aplicada a uma pessoa é definida como a tensão induzida na superfície do solo adotando, conservativamente, uma distância de 1 m entre seus pés. Por sua vez, a *tensão de toque* corresponde à tensão induzida em uma pessoa tocando algum elemento da instalação conectado ao sistema de aterramento (carcaça de equipamento, estruturas, ferragens de fixação, etc.). Cumpre observar que tanto as tensões induzidas na superfície do solo como as tensões transversais no aterramento são determinadas desconsiderando a presença da pessoa, isto é, desprezando o efeito da corrente que circula pela mesma, sendo calculados de acordo com a metodologia descrita no Item 3.1.2.

No que diz respeito às solicitações transitórias, embora as normas e os procedimentos utilizados na maioria dos projetos ainda apresentem pouca (ou nenhuma) intenção de se investigar, avaliar ou definir critérios de riscos de pessoas em instalações energizadas, alguns procedimentos operacionais de segurança, como a obrigatoriedade na utilização de equipamentos de proteção (luvas, botas isolantes, etc.) e a interrupção dos serviços de manutenção em condições meteorológicas adversas (excetuando-se sob emergências), conferem uma certa proteção adicional às pessoas que circulam por estas instalações.

Todavia, são justamente nas situações onde não são exigidos tais procedimentos de segurança ou não os observam por descuido, que se registram muitos casos de acidentes. As condições típicas para esta exposição dizem respeito à *tensão transferida*, que na realidade é uma variante da condição de toque só que associada à indução em cabos isolados ou conectados ao aterramento, sendo “transferida” através dos mesmos para um ponto “distante” do aterramento (cuja tensão induzida no solo seja pouco representativa ou até mesmo desprezível).

É comum observar em subestações os relatos da ocorrência de choques associados à incidência de descargas atmosféricas (atingindo diretamente as instalações ou as linhas de transmissão interligadas), sendo frequentemente percebidos por operadores no interior da casa de comando ou até mesmo por pessoas que normalmente estão na região periférica da instalação, como é o caso de seguranças dentro da própria cabine de vigilância. Ocorrem em diferentes níveis de severidade e mais comumente quando os indivíduos estão em contato com algum equipamento ou estrutura metálica, como painel de instrumento, telefone, portas, dentre outros.

Este tipo de problema está relacionado não só à *tensão de toque*, mas principalmente à *tensão transferida* através da indução em cabos de sinais e de aterramentos e em circuitos de telefonia e de baixa tensão. Deve-se basicamente a determinados procedimentos de blindagem de cablagem que não são capazes de tratar corretamente este efeito e à prática usual de analisar os sistemas de aterramento somente à frequência industrial, a qual não permite avaliar as tensões sob regime transitório.

Infelizmente, um conceito tradicionalmente utilizado em projetos de subestações (e que por vezes ainda é adotado sem critério), diz respeito à interconexão de qualquer equipamento ou estrutura metálica ao sistema de aterramento. Em se tratando de elementos que não estão sobre a área da malha de terra, estas interligações são feitas através de “rabichos” e se tornam extremamente perigosas por transferir para um local “remoto” da malha as tensões presentes nos condutores do aterramento.

Outro fator mais agravante é que, mesmo utilizando apenas a análise à frequência industrial, as áreas não pertencentes ao pátio de equipamentos (como casa de comando, guaritas e etc.) são, por vezes, tratadas com menos rigor no que se refere ao atendimento aos critérios de segurança de pessoas (a 60 Hz). Em certas subestações, ainda mais alarmante é o fato de não existir malha de terra (ou qualquer outro elemento que procure equalizar as tensões no solo) em tais locais.

3.2.3 CRITÉRIOS DE RISCO

Os critérios de risco são definidos considerando os efeitos nocivos provocados por correntes que venham a circular pelo corpo de uma pessoa. As conseqüências fisiológicas são dependentes de fatores como a forma de onda da corrente aplicada e suas características e o “caminho” através do corpo por onde a mesma circula. Por isso, os limites toleráveis distinguem-se quanto à natureza dos sinais aplicados e às situações de contato do corpo.

De um modo geral, as condições de segurança são estabelecidas de modo a minimizar predominantemente os riscos de fibrilação ventricular. Contudo, para as correntes a 60 Hz com tempo de aplicação superior a alguns segundos, a tetanização muscular passa a ser o efeito a ser evitado.

Correntes à Freqüência Industrial

Apesar de os limites admissíveis para estas correntes ser um assunto amplamente discutido e definido em norma [34], basicamente eles foram obtidos a partir dos experimentos apresentados em [35], onde se estabelece a associação entre o efeito de fibrilação ventricular com a energia armazenada pelo corpo humano. Dessa forma, para uma corrente com tempo de duração de 0,3 a 3,0 s, o valor eficaz máximo que apresenta uma pequena probabilidade de fibrilação é obtido de acordo com a seguinte equação:

$$I^2 \cdot t = k$$

onde: k - coeficiente relacionado à energia absorvida pelo corpo, A².s;

t - tempo de duração do curto-circuito, s;

I - valor rms da corrente máxima permitida, A.

De acordo com os resultados dos trabalhos de Dalziel [35], é proposto em [34] um valor de $\sqrt{k} = 0,116$, para uma probabilidade 0,5% de fibrilação.

Contudo, em [36] é apresentada a análise de alguns critérios e metodologias empregados em [35], sendo apontadas algumas incoerências cometidas neste estudo e o equívoco de se adotar esta relação como limiar de segurança, principalmente para faixa de domínio próxima ao período cardíaco e um pouco superior (0,8 a 3 s), onde há um efeito cumulativo dos sinais perturbadores que não é representada por esta relação. Por isso, é proposto em [36], utilizando também [37], o tipo de condição limitante para a corrente permissível apresentada na figura a seguir, que considera mais adequadamente os mecanismos biológicos associados à freqüência industrial. Para o intervalo de tempo anteriormente referido, o comportamento é baseado numa relação do tipo $I \cdot t = k$, conforme indicado na figura a seguir:

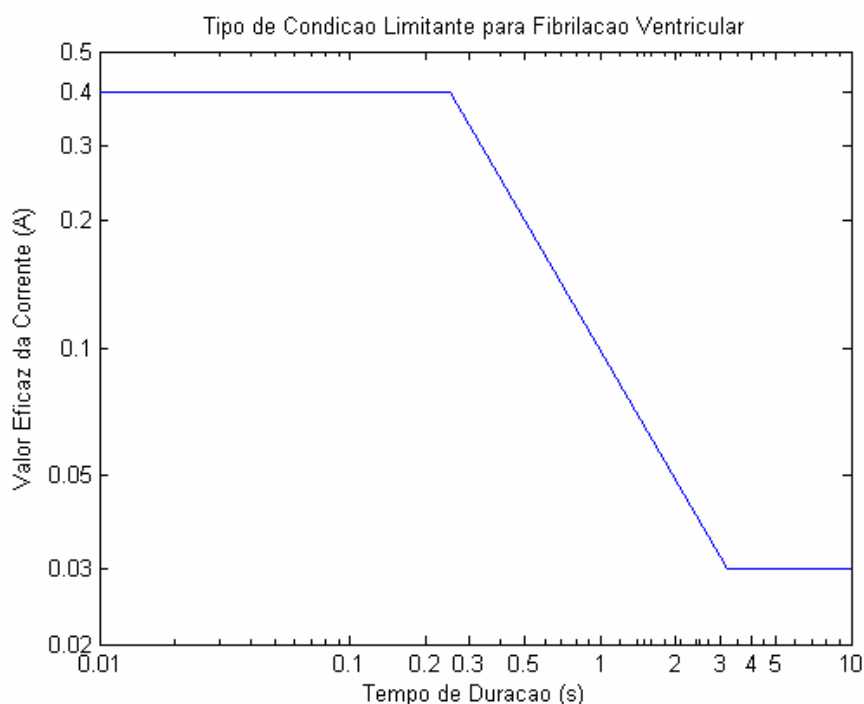


Figura 3.5 – Tipo de condição de segurança limite associada à fibrilação ventricular proposto em [36], considerando correntes à frequência industrial para um adulto saudável.

Para tempos de duração inferiores a 1/3 do período cardíaco ($\approx 0,3$ s) o limiar da fibrilação é basicamente estatístico e independe do tempo. Isto porque a sensibilidade à perturbação é elevada somente durante cerca de 1/3 do período cardíaco (aproximadamente 20 vezes superior a dos 2/3 do período restante). Para tempos superiores (≥ 3 s), estabelece-se uma saturação do efeito cumulativo, atingindo um limiar de fibrilação constante.

Por sua vez, em se tratando de correntes com tempo de duração muito elevado (≥ 30 s), os limites são de aproximadamente 9 mA para homens e 6 mA para mulheres e são referentes à condição de tetanização muscular.

Correntes Impulsivas

No que se refere aos efeitos das correntes de natureza transitória no corpo humano, uma grande dificuldade é que há pouca disponibilidade de informações e os ensaios são muito restritos, principalmente se forem comparados às correntes a 60 Hz. Os critérios utilizados neste trabalho foram obtidos de [8,36,38-41], e se baseiam no efeito cumulativo da corrente que circula pelo corpo, considerando a variação da resistência do corpo em função da

tensão aplicada, as impedâncias de contato dos pés com o solo para as diferentes situações de risco e os parâmetros estatísticos das descargas atmosféricas.

De acordo com [8,39-40], os parâmetros de severidade ($S_{1,4}$) associados à fibrilação ventricular são obtidos de acordo com a expressão:

$$S_{1,4} = \int |i_C|^{1,4} dt \quad \text{Equação 3-14}$$

sendo i_C a corrente que circula pelo corpo humano.

As condições limitantes deste parâmetro, para adultos saudáveis, são:

$L(S_{1,4}) = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ A}^{1,4}\text{s}$, para uma probabilidade desprezível de fibrilação;

$L(S_{1,4}) = 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ A}^{1,4}\text{s}$, para uma probabilidade de 5% de fibrilação.

Em se tratando de conseqüências fisiológicas de menor risco, o parâmetro de severidade S_1 está associado à carga transferida ao corpo:

$$S_1 = \int |i_C| dt$$

Os limites de acordo com [8,39] são obtidos a partir de [38], sendo adotados os seguintes valores:

$L(S_1) = 0,36 \text{ a } 0,9 \mu\text{C}$, para o limiar da percepção;

$L(S_1) = 7,6 \mu\text{C}$, para a sensação de choque intenso.

Por sua vez, os critérios de risco associados à fibrilação ventricular são determinados considerando a seguinte relação aproximada, que define o parâmetro $\tau_{1,4}$:

$$\frac{\int |i_C(t)|^{1,4} dt}{I_C^{1,4}} \cong \frac{\int |u(t)|^{1,4} dt}{U^{1,4}} = \tau_{1,4} \quad \text{Equação 3-15}$$

sendo: $i_C(t)$ – corrente que circula pelo corpo humano;

I_C – valor máximo de $i_C(t)$;

- $u(t)$ – tensão total aplicada entre os pontos de contato (pontos aterrados e a superfície do solo ou entre pontos na superfície do solo);
 U – valor máximo de $u(t)$.

A partir de ensaios e critérios estabelecidos em [37] e de definições estabelecidas em [36], pode-se determinar a resistência do corpo em função da tensão máxima aplicada ao mesmo, de acordo com a seguinte expressão:

$$R = K \cdot U_c^{-0,2} \quad \text{Equação 3-16}$$

onde: R – resistência do corpo humano, Ω ;

$$K = 2,9 \cdot 10^3;$$

U_c – valor máximo da tensão aplicada sobre o corpo, V.

Determina-se a impedância equivalente do corpo por:

$$|Z_1| = \frac{U_c}{I_c} = |k_a| \cdot R \quad \text{Equação 3-17}$$

sendo: $k_a = 0,817$, coeficiente associado à impedância do corpo [8].

As impedâncias de contato dos pés com o solo (Z_2) são estabelecidas de acordo com [41], em que se utiliza uma modelagem dos pés através de placas elípticas de metal, considerando o acoplamento entre as placas e a presença de uma camada de revestimento de diferente resistividade. Para as condições de toque e passo, tem-se:

$$Z_2 = k_T \cdot F_T \cdot \rho_b \quad \Rightarrow \quad \text{Condição de Toque}$$

$$Z_2 = k_P \cdot F_P \cdot \rho_b \quad \Rightarrow \quad \text{Condição de Passo}$$

sendo: $\rho_b = \frac{1}{\sigma_b + j\omega\epsilon_b}$, parâmetros da camada de revestimento (tipicamente brita), $\Omega \cdot m$;

$$k_T = 1,274 \quad , \text{ para condição de toque, } m^{-1};$$

$$k_P = 4,461 \quad , \text{ para condição de passo, } m^{-1};$$

$$F_T = F_1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_b} \right) \cong F_1 \left(\left| \frac{\rho_s}{\rho_b} \right| \right), \text{ obtido graficamente a partir [41];}$$

$$F_p = F_1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_b} \right) \cong F_1 \left(\left| \frac{\rho_s}{\rho_b} \right| \right), \text{ obtido graficamente a partir [41];}$$

$$\rho_s = \frac{1}{\sigma_s + j\omega\epsilon_s}, \text{ parâmetros do solo, } \Omega.m.$$

Dessa forma, pode-se determinar a relação entre a tensão máxima aplicada sobre o indivíduo (entre diferentes pontos de contato) e a corrente máxima que circula pelo seu corpo através da seguinte equação:

$$\frac{U}{I_C} = (|Z_1| + |Z_2|) \quad \text{Equação 3-18}$$

Devido às incertezas associadas à determinação das impedâncias Z_1 e Z_2 , é aceitável, de acordo com [8,39], considerar os parâmetros do solo e da camada de revestimento somente à frequência de 150 kHz. Sendo a brita o revestimento tipicamente utilizado em pátios de subestações, será adotado, com base em [8], os seguintes parâmetros:

$$\sigma_b = 170 \times 10^{-6} \text{ S/m} \quad \omega\epsilon_b = 120 \times 10^{-6} \text{ S/m}$$

No entanto, especificamente nos casos de estruturas de linhas de transmissão, não é prática usual utilizar camada de revestimento para recobrir o solo nas suas proximidades. Este procedimento se deve basicamente aos costumes habituais de não se analisar os aterramentos quanto à segurança de pessoas e aos comuns atos de vandalismo, que fatalmente removeriam a brita. Neste caso, ter-se-ia $F_T = F_p = 1$ e seria utilizado os parâmetros elétricos (σ e $\omega\epsilon$) do solo em vez da brita.

A tensão entre diferentes pontos de contato (u), entre pontos aterrados e a superfície do solo (tensão de toque) ou entre pontos na superfície do solo (tensão de passo), está associada à corrente injetada no sistema de aterramento (i), podendo ser definido o parâmetro $H_{1,4}$ a partir da seguinte relação:

$$H_{1,4} = \frac{\int |u(t)|^{1,4} dt}{\int |i(t)|^{1,4} dt} \quad \text{Equação 3-19}$$

Aplicando a Equação 3-15 na anterior e adotando a relação estabelecida na Equação 3-18, obtém-se:

$$\int |i(t)|^{1,4} dt = \frac{\int |u(t)|^{1,4} dt}{H_{1,4}} = \frac{U^{1,4} \cdot \tau_{1,4}}{H_{1,4}} = \frac{U^{1,4}}{I_C^{1,4}} \frac{\int |i_C(t)|^{1,4} dt}{H_{1,4}}$$

$$\int |i(t)|^{1,4} dt = \frac{(|Z_1| + |Z_2|)^{1,4}}{H_{1,4}} \int |i_C(t)|^{1,4} dt$$

Considerando o critério limitante para fibrilação ventricular $L(S_{1,4})$, de acordo com a Equação 3-14, define-se:

$$D = \frac{(|Z_1| + |Z_2|)^{1,4}}{H_{1,4}} L(S_{1,4}) \quad \text{Equação 3-20}$$

Com isso determina-se a probabilidade de a descarga exceder as condições limitantes de risco, de acordo com:

$$\int |i(t)|^{1,4} dt > D$$

Utilizando o critério limitante para fibrilação ventricular $L(S_{1,4})$ e aplicando a Equação 3-14 na Equação 3-15, determina-se a corrente crítica máxima através de:

$$I_C \cong \sqrt[1,4]{\frac{L(S_{1,4})}{\tau_{1,4}}}$$

Por sua vez, a tensão crítica máxima aplicada ao corpo de um indivíduo é então obtida aplicando-se a Equação 3-16 na Equação 3-17, de acordo com:

$$U_C \cong \sqrt[1,2]{|k_a| \cdot K \cdot I_C}$$

A partir da simulação do sistema de aterramento, determinam-se as tensões aplicadas aos pontos de contato (u) sob diferentes condições e locais de risco. De posse destes valores,

calculam-se os parâmetros $H_{1,4}$, $\tau_{1,4}$ e por conseguinte I_C e U_C . A impedância do corpo humano (Z_1) é obtida a partir de U_C e a de contato dos pés com o solo (Z_2), através dos parâmetros elétricos do solo e da camada de revestimento. Assim define-se D , que estabelece o critério limitante para condição de segurança associada à fibrilação ventricular.

Considerando os primeiros impulsos das descargas atmosféricas de polaridade negativa, tem-se o seguinte comportamento para a probabilidade de exceder o parâmetro $\int |i(t)|^{1,4} dt$, de acordo com [8].

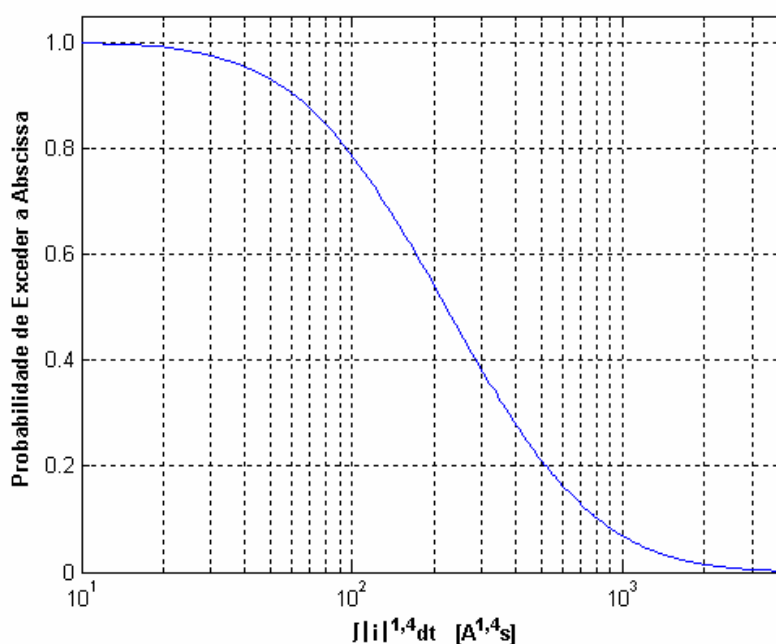


Figura 3.6 – Probabilidade de exceder a abscissa $\int |i(t)|^{1,4} dt$ para os primeiros impulsos de descargas de polaridade negativa.

3.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No que se refere ao tempo de processamento do programa, se for simulado um sistema de aterramento tipicamente empregado em estruturas de LT's, composto por quatro cabos contrapeso radiais, sendo considerado um comprimento de 30 m para cada cabo e adotando-se um comprimento de segmentos de 0,2 m (ou seja, formando cerca de 600 segmentos), tem-se aproximadamente 6 horas de processamento computacional (utilizando-se um processador Pentium IV 1,6 GHz com 256 MB de RAM). Nesta *Análise de Sistemas de Aterramento sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão*.

simulação são determinadas além da tensão do sistema de aterramento, as tensões de toque e passo em cerca de 20 pontos.

Cumprindo observar que o computador utilizado não é o mais adequado para este tipo de cálculo. O uso de um com maior capacidade computacional certamente promoverá uma redução significativa do tempo de processamento. Em testes experimentais com um P-IV 3,0 GHz (Dual Core) de 1GB RAM, obteve-se uma diminuição de cerca de 30% no tempo de simulação.

Apesar dessa redução, faz-se necessário tornar o programa mais eficiente. Isto é possível através da otimização de alguns processos utilizados atualmente, implementando-se métodos de resolução matricial mais rápidos que a inversão de matrizes e empregando-se um procedimento para identificar a simetria entre segmentos (configuração de par de segmentos que se repete no sistema de aterramento) de forma a evitar cálculos redundantes. Esta última alternativa causa um sensível impacto no tempo de simulação, pois como em geral a configuração dos condutores dos sistemas de aterramento apresenta simetria, há um grande desperdício de tempo com o cálculo repetitivo dos acoplamentos entre pares de segmentos idênticos (mesmo tamanho e mesma disposição geométrica).

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DA CORRENTE INJETADA NOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O comportamento dos sistemas de aterramento está associado não somente a fatores como solo e a configuração dos condutores, mas sobretudo à natureza das correntes que serão injetadas. Como já visto no capítulo anterior, tanto a metodologia de análise como os critérios de desempenho e segurança de pessoas e equipamentos são definidos de acordo com o tipo de solicitação. Por isso, quer seja à frequência industrial ou sob transitórios, é fundamental que a corrente que escoar pelo aterramento seja modelada de forma adequada e representativa.

Contudo, no que se refere à análise sob solicitações impulsivas, esta modelagem é bem mais complexa, pois além de ser necessário avaliar as características das descargas atmosféricas, a corrente propriamente injetada no aterramento deve ser determinada considerando a presença de outros elementos conectados ao mesmo, principalmente cabos pára-raios. Para determinar esta corrente é preciso utilizar um modelo que considere corretamente os fenômenos eletromagnéticos associados à propagação de surtos em linhas de transmissão.

Por sua vez, quando se tem por objetivo considerar o comportamento de variáveis estatísticas, principalmente de origem atmosféricas, devem ser observados cuidadosamente os tratamentos probabilísticos, principalmente no que se refere ao espaço amostral considerado na análise, em termos qualitativos e quantitativos. Neste trabalho são adotados conceitos e modelagens definidos em [4], sendo utilizados os resultados experimentais de [42], já consagrados e validados através de diferentes medições.

Dessa forma, neste capítulo serão apresentados os principais parâmetros e a forma de onda representativa das descargas atmosféricas, sendo também descritos os princípios básicos do mecanismo de captação de descargas em subestações e linhas de transmissão.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

4.1.1 CONCEITOS BÁSICOS

O acúmulo de cargas elétricas em nuvens, ocasionado principalmente pelo atrito com o ar durante o deslocamento, provoca a indução eletromagnética de cargas de sinais contrários no solo ou em elementos sob a área de influência das nuvens, estabelecendo dessa forma um intenso campo elétrico entre essas superfícies.

Contudo, antes de se formar a descarga propriamente dita, estas cargas produzem canais ionizados, que vão progredindo gradativamente por trechos à medida que elas avançam pelos mesmos. O mecanismo básico está associado ao campo elétrico que se constitui na vizinhança de uma concentração de cargas, desencadeando a formação de um canal elementar. Após desenvolver um trecho de canal, há um acúmulo de cargas na sua extremidade que por sua vez estabelecem um novo canal ionizado a partir do anterior.

Estes canais, denominados precursores, podem ser predominantemente descendentes ou ascendentes de acordo com tipo de obstáculo a ser atingido. De um modo geral são descendentes para a maioria dos casos (solos, linhas de transmissão e subestações), sendo observados precursores ascendentes em se tratando de obstáculos condutores muito altos ou localizados em pontos elevados. Esta predominância não significa que exclusivamente haja somente canais descendentes ou ascendentes, pois em ambas as condições formam-se canais ionizados (em maior ou menor intensidade) tanto a partir da nuvem como do solo (ou obstáculo atingido).

A progressão e conseqüente interligação dos canais descendentes da nuvem com os canais ascendentes do solo / objeto condutor (ou vice-versa) estabelece um canal de condução de corrente, que constitui a descarga atmosférica propriamente dita. Cumpre observar que os canais precursores podem também se formar entre nuvens, dando origens a descargas nuvem-nuvem.

Após a ocorrência da primeira descarga, no caso de descargas de polaridade negativa, podem surgir descargas subseqüentes pelo mesmo canal de condução devido aos movimentos de cargas nas nuvens e no solo originados pela alteração do campo eletromagnético.

As descargas são normalmente caracterizadas por correntes de elevada intensidade e de curta duração, sendo suas principais características definidas a partir de análise estatística, conforme apresentado no item a seguir.

4.1.2 PARÂMETROS DAS DESCARGAS

As características estatísticas das descargas atmosféricas estão definidas principalmente com base nos ensaios e medições de [42]. De acordo com [4], tais parâmetros podem ser representados por distribuições do tipo log-normal. As figuras a seguir apresentam as distribuições de probabilidade acumulada para os principais parâmetros de descargas descendentes, sendo classificadas conforme os seguintes tipos de descarga:

- 1 – Primeiro impulso ou impulso único de descargas negativas;
- 2 – Impulsos subseqüentes para descargas negativas com mais de um impulso;
- 3 – Descargas positivas, que são comumente formadas por um impulso único.

A classificação positiva ou negativa refere à polaridade das cargas de nuvem que originam as descargas. Em se tratando de descargas naturais descendentes cerca de 90% são descargas negativas.

Cumprindo observar que validações através dos ensaios de [43], constataram que os procedimentos experimentais adotados em [42] causaram certa interferência nas medições para as descargas positivas. Em [43] foram obtidas distribuições de amplitudes máximas para estes tipos de descargas semelhantes às das descargas negativas de impulso único ou primeiro impulso.

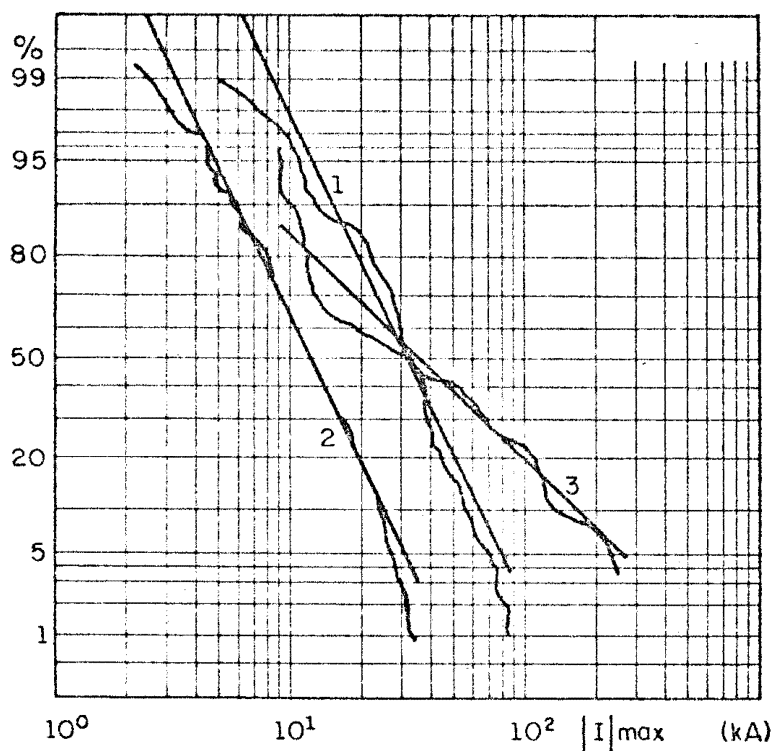


Figura 4.1 – Distribuição de probabilidade acumulada do valor de crista da corrente de descarga [4].

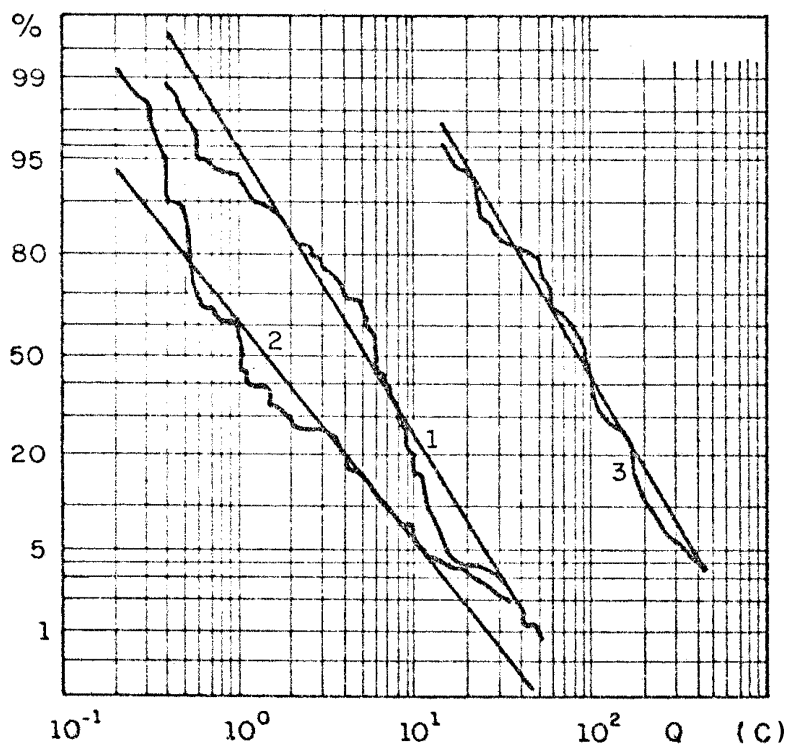


Figura 4.2 – Distribuição de probabilidade acumulada da carga de um impulso de descarga [4].

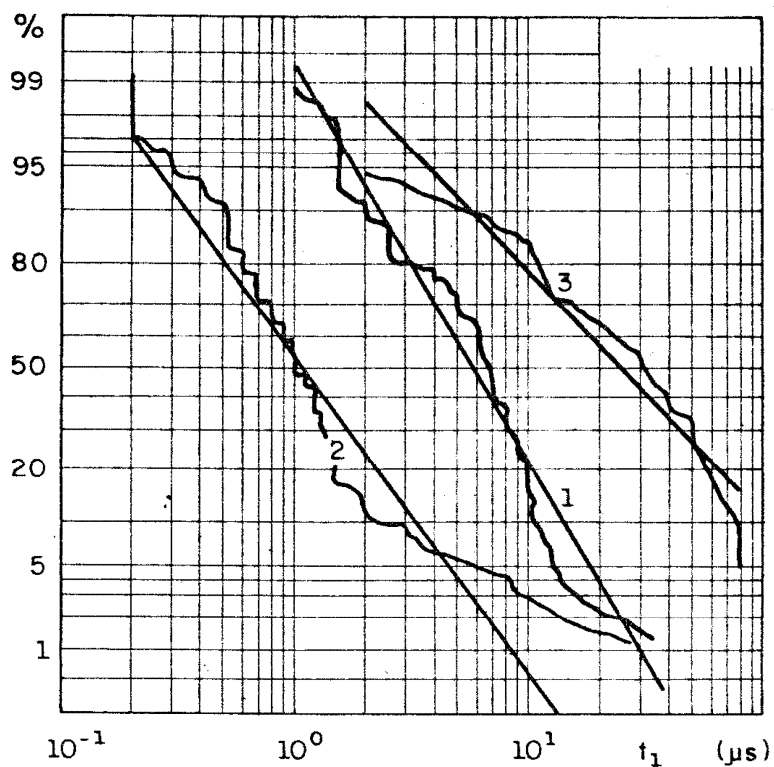


Figura 4.3 – Distribuição de probabilidade acumulada da duração do tempo de frente de onda (intervalo de tempo entre atingir 2 kA e o valor de crista) [4].

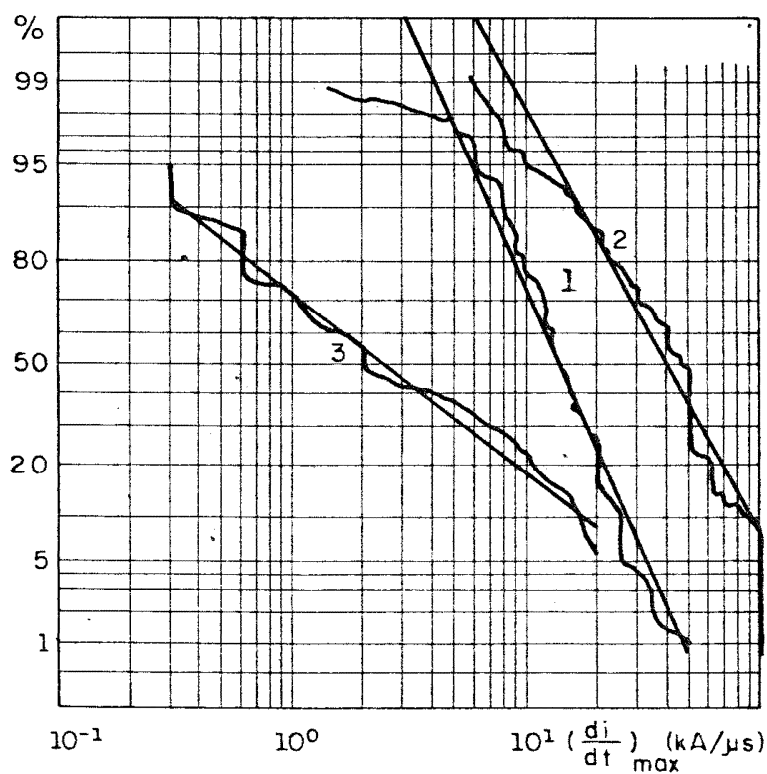


Figura 4.4 – Distribuição de probabilidade acumulada do valor máximo de di/dt [4].

Em se tratando do comportamento da corrente de descarga, no primeiro impulso ou impulso único, apesar de o canal estar ionizado, sua resistência apresenta inicialmente um valor considerável, pois o mesmo ainda não se encontra totalmente ionizado. À medida que a corrente escoar pelo canal, aumenta a sua ionização e conseqüentemente reduz a resistência. Por isso, a derivada da corrente é inicialmente limitada pela elevada resistência do canal e cresce com o aumento da corrente de descarga. No caso de impulsos subseqüentes (para descargas negativas), o canal já está fortemente ionizado e a corrente atinge o seu máximo rapidamente, tendo sua derivada valores mais elevados.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 4.4, pode-se constatar que a derivada da corrente para o primeiro impulso ou impulso único das descargas apresenta-se bem inferior ao dos impulsos subseqüentes. Isto também pode ser observado nas figuras a seguir, que apresentam algumas formas de onda típicas obtidas para descargas de polaridade positiva, para os primeiros impulsos de descargas negativas e impulsos subseqüentes.

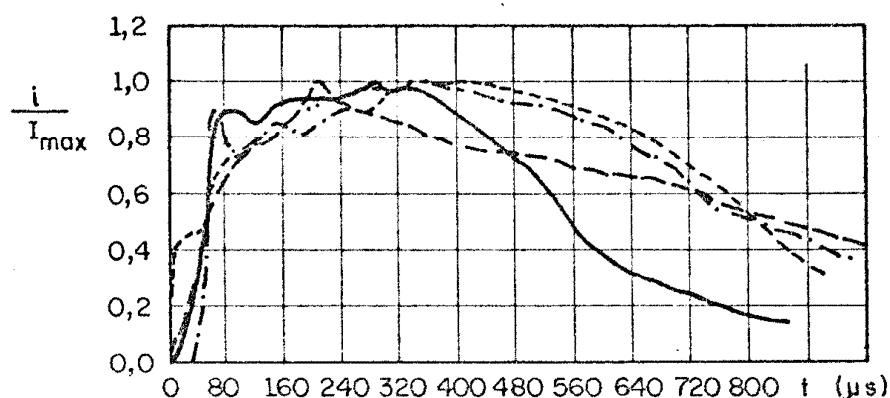


Figura 4.5 – Formas de onda típicas de descargas de polaridade positiva [4].

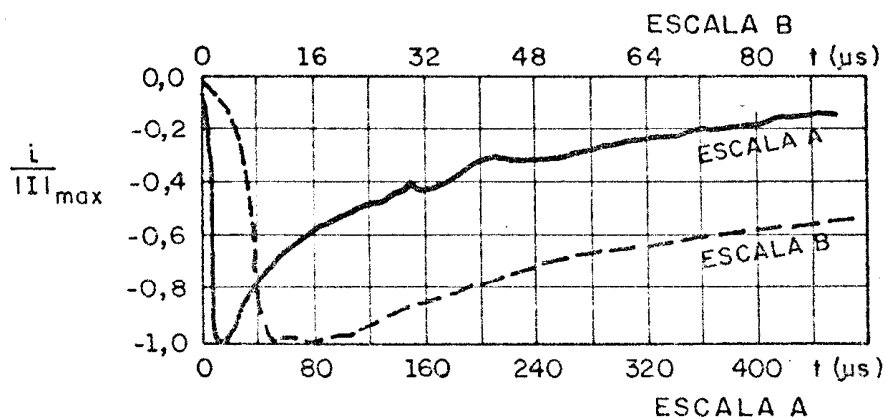


Figura 4.6 – Forma de onda típica dos primeiros impulsos de descargas negativas [4].

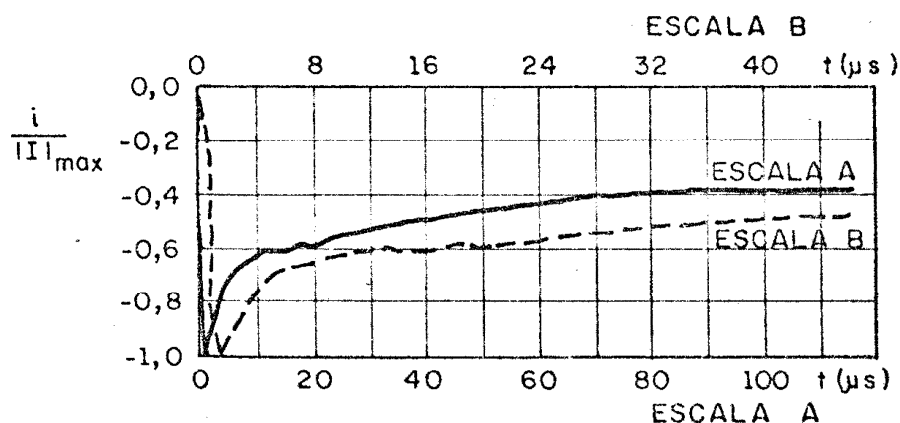


Figura 4.7 – Forma de onda típica dos impulsos subsequentes de descargas negativas [4].

No que se refere à representação da forma de onda da corrente de descarga, é usualmente utilizado em estudos e padronizado através de normas [44] a dupla exponencial. Isto se deve não só à facilidade em se manipular analiticamente a expressão matemática, que é apresentada na Equação 4-1 a seguir, mas principalmente por corresponder às características dos sinais obtidos pelos geradores de impulso utilizados em ensaios, que se baseiam na descarga de circuitos capacitivos.

$$I(t) = I_0 \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{Equação 4-1}$$

Os parâmetros I_0 , α e β podem ser determinados através do método descrito em [45] a partir da amplitude máxima (I_{max}), dos tempos de frente de onda (t_f) e de meia onda (t_m). A forma de onda característica da dupla exponencial é apresentada na figura a seguir, sendo indicado também os referidos tempos.

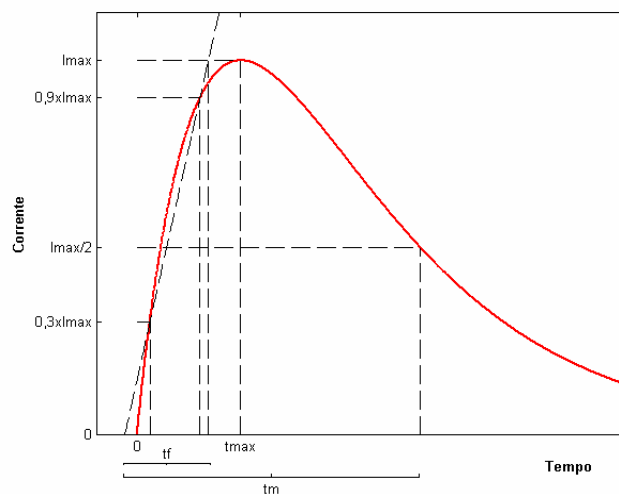


Figura 4.8 – Representação da onda do tipo dupla exponencial indicando os tempos.

Como se pode observar, o tempo de frente de onda está associado à derivada da curva no instante inicial e não ao instante que a curva atinge o valor máximo (t_{max}). Considerando a “onda padrão” 1,2/50 μ s, sendo de 1,2 μ s o tempo de frente e de 50 μ s o tempo de meia onda, têm-se os seguintes parâmetros K , α e β da Equação 4-1, de acordo com [45], e a correspondente forma de onda.

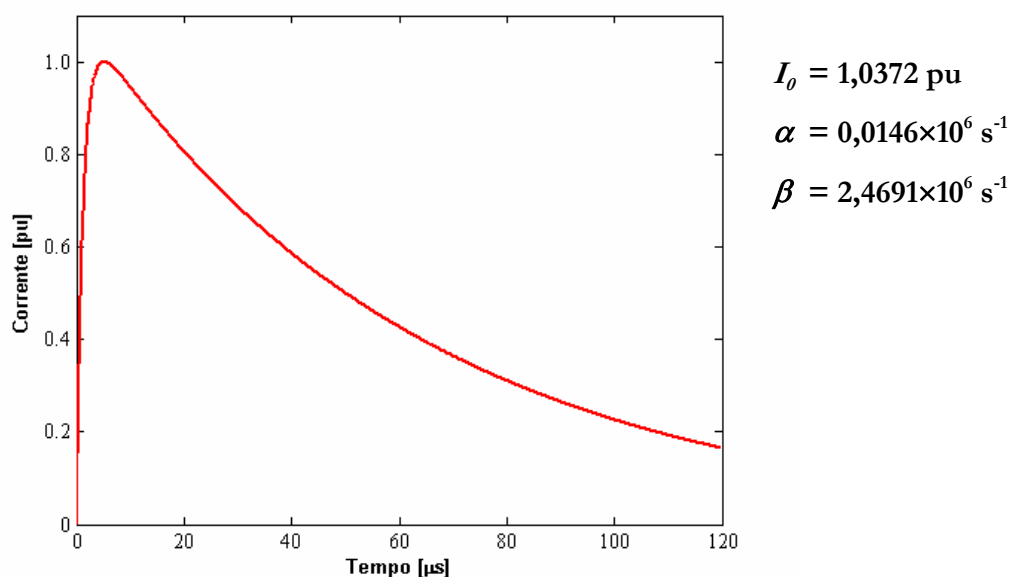


Figura 4.9 – Representação da forma de onda “normalizada” para descargas atmosféricas do tipo dupla exponencial 1,2/50 μ s.

Contudo, esta forma de onda não é a mais adequada para representar aos mecanismos físicos associados à descarga atmosférica (principalmente em se tratando de descargas com impulso único ou do primeiro impulso de descargas múltiplas), pois além de se observar que a derivada da corrente é máxima no início do processo e decai com o aumento da corrente, o tempo de frente não corresponde ao tempo para se atingir o valor de pico, revelando uma característica com pouca representatividade.

A forma de onda proposta por Berger [42] e utilizada em [4,8,39-40,46] apresenta uma modelagem mais adequada aos fenômenos característicos das descargas negativas. A figura a seguir apresenta o comportamento desta onda, considerando um valor normalizado para a corrente máxima.

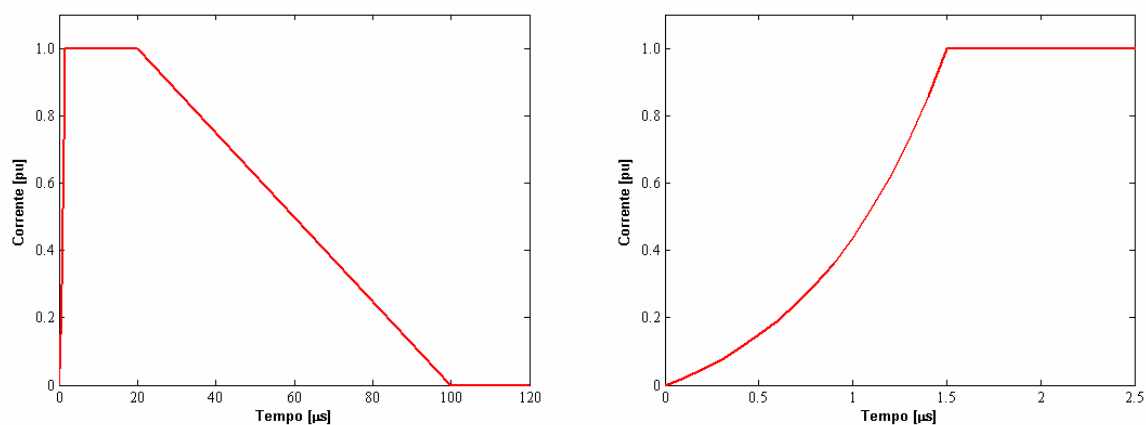


Figura 4.10 – Forma de onda proposta por Berger [42] representativa de descargas negativas.

A frente de onda é obtida de acordo com a seguinte equação:

$$i(t) = I_{MAX} \cdot \frac{e^{\frac{\alpha t}{T_p}} - 1}{e^{\alpha} - 1}, \quad 0 < t < T_p$$

sendo usualmente considerados: $T_p = 1,5 \mu s$ e $\alpha = 2$.

Por sua vez, a cauda da onda é expressa pela equação:

$$i(t) = I_{MAX} \frac{t - T_M}{T_{MAX} - T_M}, \quad T_M < t < T_{MAX}$$

sendo usualmente considerados: $T_M = 20 \mu s$ e $T_{MAX} = 100 \mu s$.

Esta forma de onda produz resultados de maior severidade, no que diz respeito aos valores máximos das tensões no sistema de aterramento e induzidas no solo, se comparados à dupla exponencial [5,8,39,40,46,47].

Como anteriormente descrito, o comportamento desta forma de corrente é representativo de descargas de polaridade negativa. Ela será utilizada neste trabalho, pois além de as descargas negativas corresponderem a maioria das descargas (cerca de 90%), as positivas apresentam frentes de onda mais lentas.

4.2 ANÁLISE DA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para se determinar a incidência de descargas atmosféricas em uma instalação, há de se considerar modelos estatísticos e tratamentos probabilísticos para a definição da densidade de descargas características de uma região, dos parâmetros da descarga e da metodologia para cálculo da captação das descargas. Neste item serão abordados de forma qualitativa os principais conceitos envolvidos no mecanismo de incidência das descargas.

4.2.1 ÍNDICE DE DESCARGAS DE UMA REGIÃO

O número de descargas que incidem em uma região pode ser determinado satisfatoriamente a partir do nível ceráunico, que corresponde ao número médio de dias com trovoadas por ano. Apesar de não ser uma medida precisa a respeito das descargas propriamente ditas, este índice é caracterizado pela robustez dos resultados, tendo sido obtidos durante um longo período de observação. O mapeamento deste parâmetro, conforme apresentado no Capítulo 2, fornece dados importantes quanto ao comportamento deste tipo de atividade climática.

De acordo com [46-47], considerando o nível ceráunico médio (N) de uma região, obtido através da Figura 2.2, tem-se que o número de descargas (N_D) pode ser estimado a partir das expressões a seguir, sendo representada graficamente na Figura 4.11.

$$N_D \cong 0,050 \cdot N^{1,301}, \quad \text{para } N \leq 100$$

$$N_D \cong 0,019 \cdot N^{1,511}, \quad \text{para } N > 100$$

sendo: N – nível ceráunico da região obtido através da Figura 2.2;

N_D – número médio de descargas/km²/ano.

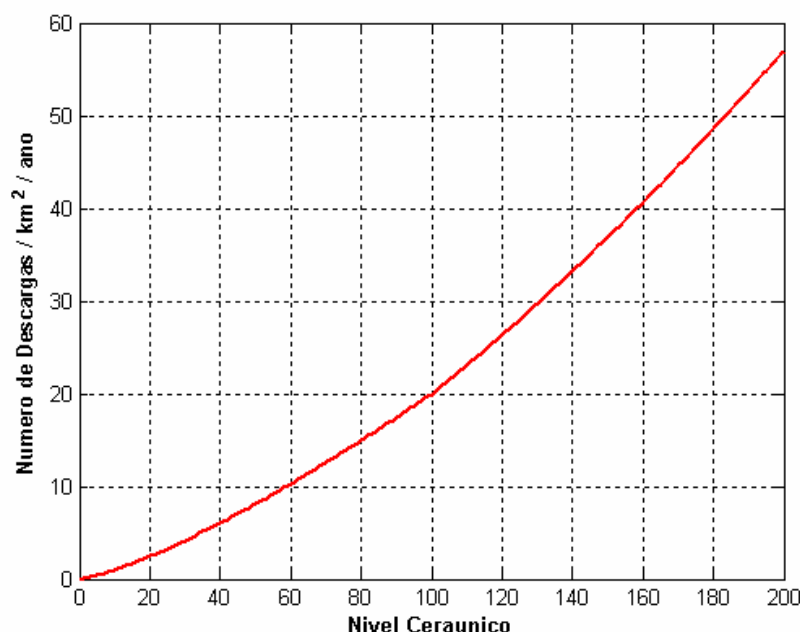


Figura 4.11 – Número médio de descargas/km²/ano em função do nível cerâmico.

Contudo, a crescente preocupação com este fenômeno climático e a necessidade de se obter dados estatísticos de maior precisão vêm impulsionando o monitoramento das descargas atmosféricas, objetivando analisar não só a densidade de descargas de uma região, mas também à classificação de alguns parâmetros, como polaridade e corrente máxima. E foi com este objetivo que se desenvolveu o sistema da RINDAT, “Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas”, que atualmente abrange uma área de cerca de 1/3 localizada principalmente nas regiões de maior incidência do país (pretendendo futuramente cobrir uma área de 2/3) e que vem atuando no sentido de compor um banco de dados unificado entre os diversos agentes participantes (FURNAS, CEMIG, INPE e SIMEPAR). O mapeamento das descargas obtido entre 1999 e 2003 pode ser observado na Figura 2.4 do Capítulo 2.

Além do monitoramento climático, o sistema procura compartilhar informações em tempo real com os centros de operação do sistema elétrico, com o objetivo de prever a possível ocorrência de tormentas elétricas nas principais regiões analisadas.

No entanto, apesar deste monitoramento ser notoriamente necessário e fundamental para se determinar mais precisamente as estatísticas das descargas do país, na prática observa-se

que os dados provenientes deste sistema ainda se apresentam muito susceptíveis a erros de medição, revelando informações incorretas no que se refere não só à localização, mas também às correntes máximas das descargas. Esta incoerência é observada principalmente em regiões montanhosas e se deve ao fato de o modelo utilizado considerar o solo como sendo plano e de resistividade constante, desconsiderando a permissividade do mesmo e a dependência dos referidos parâmetros elétricos com a frequência. Segundo [54], em determinadas condições, os erros associados aos valores de crista da corrente de descarga podem se situar em 100% e quanto à localização das mesmas, pode-se ter até cerca 100 km de “precisão”.

A fim de exemplificar o exposto anteriormente, no que se refere à densidade de descargas, será confrontado o mapeamento da RINDAT apresentado na Figura 2.4 com o nível cerâmico, indicado na Figura 2.2. Dessa forma, analisando os dados da RINDAT, tem-se que o número máximo é de 14,3 descargas/km²/ano e está localizado em São Paulo, nas proximidades de sua capital. Por sua vez, na Figura 2.2, constata-se que nesta região o nível cerâmico máximo é de 60 e segundo o gráfico da Figura 4.11 para este nível tem-se aproximadamente 10,3 descargas/km²/ano. Apesar de os valores obtidos estarem de certa forma coerentes, o mesmo não se pode afirmar em outras regiões, como na parte oeste de São Paulo e de Minas Gérias e em praticamente todo o estado do Paraná e de Goiás, onde são obtidos níveis cerâmicos de 80 (cerca de 15 descargas/km²/ano), sendo que de acordo com a RINDAT o máximo seria de 3 descargas/km²/ano. Nestas regiões há a predominância de áreas montanhosas e poucos sensores, sendo realmente confirmada a existência de um elevado número de descargas.

Esta análise revela o risco de se adotar parâmetros exclusivamente a partir das estatísticas provenientes deste monitoramento, que ainda é muito recente e apresenta um desempenho por vezes pouco confiável. Contudo o sistema está em plena expansão e desenvolvimento, o que contribui para que futuramente possa ser aprimorado, aumentando a credibilidade e a segurança dos seus dados.

4.2.2 MECANISMO DE CAPTAÇÃO DAS DESCARGAS

Durante a formação do canal ionizado, é possível definir como distância de salto (R_s), o último caminho a ser estabelecido pelo canal precursor que irá interligar a nuvem ao solo

(ou ao obstáculo). De acordo com [4], esta distância apresenta uma característica estatística, sendo o valor médio obtido a partir do valor máximo da corrente máxima da descarga I_{DESC} , de acordo com:

$$\bar{R}_S = 2 \cdot I_{DESC} + 30 \cdot \left(1 - e^{-\frac{I_{DESC}}{6.8}} \right)$$

sendo: R_S - distância de salto com probabilidade 50% de ser excedida, em m;

I_{DESC} - valor de pico da corrente de descarga, em kA.

Graficamente tem-se o seguinte comportamento:

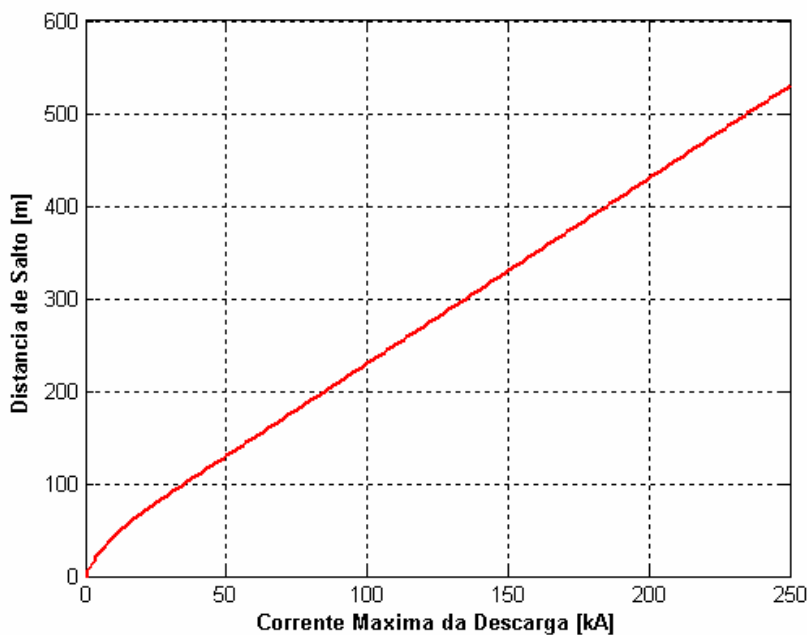


Figura 4.12 – Distância de salto em função do valor de crista da corrente de descarga.

Os movimentos do canal precursor apresentam comportamento do tipo estatístico, sendo praticamente independentes de obstáculos quando o canal ainda se encontra muito afastado dos mesmos. Contudo, quando o canal atinge uma distância inferior à R_S de obstáculos ou do solo, inicia-se o último percurso e sua trajetória é direcionada para o elemento que se encontrar mais próximo.

Cumpra observar que apesar de o último precursor possuir uma trajetória influenciada pela proximidade de elementos com relação à distância de salto, há uma dependência estatística de o mesmo atingir um determinado obstáculo existindo outro equidistante do precursor. Contudo, em face às aproximações e hipóteses adotadas para o comportamento real das descargas, esta probabilidade pode ser desprezada nos cálculos.

Dessa forma, o número de descargas captadas por uma instalação pode ser obtido através do modelo eletrogeométrico para descargas atmosféricas (EGLM) [4,46,47], que utiliza em sua formulação a forma geométrica dos elementos, a disposição dos mesmos na instalação, a distância de salto, os parâmetros estatísticos das descargas e o número de descargas que incidem na região.

No EGLM, determina-se a área de captação de descargas (A_C) de uma instalação em função da geometria e da disposição dos diversos elementos de interesse na mesma, considerando também a distância de salto e a sua dependência com relação ao valor de crista da corrente de descarga.

No entanto, a área equivalente (A_{EQ}) a ser calculada para efeitos de incidência de descarga numa instalação corresponde à projeção no solo da área de captação de descargas (A_C). Por isso, o conceito fundamental é que a área de uma instalação efetivamente exposta a descargas atmosféricas corresponde a uma área equivalente no solo na qual as descargas incidiriam caso a instalação não existisse.

Observando o exposto anteriormente, há de se analisar o ângulo de incidência do canal da descarga nos cálculos, uma vez que a projeção da área no solo vai depender da inclinação do precursor com relação à vertical. De acordo com o tipo de instalação e o tipo de obstáculo a ser avaliado, a simetria pode exigir a representação tridimensional da descarga através dos ângulos α e φ , indicados na figura a seguir.

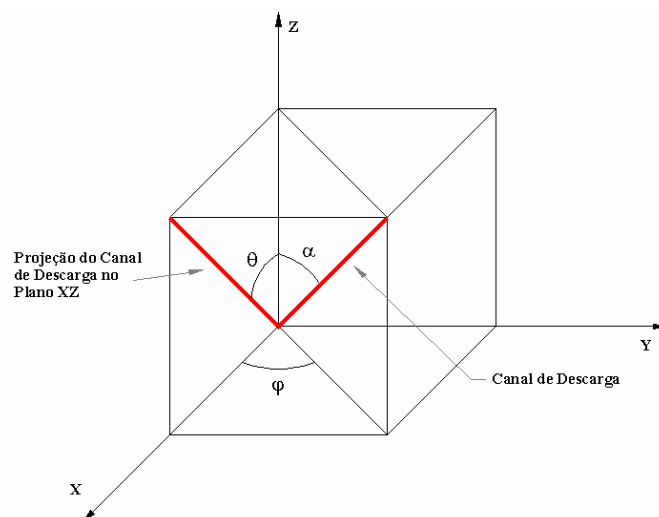


Figura 4.13 – Representação dos ângulos de incidência do canal de descarga.

Como estas são variáveis estatísticas, o efeito ponderado dos ângulos de incidência na área de captação é obtido através da integral da área equivalente $A_{EQ}(I, \alpha, \varphi)$, função da corrente e dos referidos ângulos, e da densidade de probabilidade dos mesmos $p(\alpha, \varphi)$, conforme indicado em [46,47].

Em se tratando de linhas de transmissão, a simetria com relação a sua diretriz faz com que apenas interesse o ângulo formado entre o eixo vertical e a projeção do canal de descarga no plano perpendicular ao da diretriz. Adotando a representação indicada na Figura 4.13 e supondo a diretriz da LT sobre o eixo Y, tem-se que o ângulo a ser analisado é o θ . Devido à simetria das LT's, torna-se mais conveniente também utilizar o conceito de distância de exposição equivalente (D_{EQ}), que representa a largura de captação da LT, em vez da área (A_{EQ}), uma vez que a relação entre essas grandezas é o comprimento (L) da própria linha. Com isso, tem-se que o efeito do ângulo é obtido através da integral de acordo com expressão a seguir:

$$D_{EQ}(I) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D_{EQ}(I, \theta) \cdot p(\theta) \cdot d\theta \quad \text{Equação 4-2}$$

A curva de densidade de probabilidade $p(\theta)$ pode ser obtida de acordo com [4], através da seguinte expressão a seguir.

$$p(\theta) = \frac{\cos^\beta(\theta)}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^\beta(\theta) \cdot d\theta}$$

Sendo a variável β obtida em função da altura do obstáculo de acordo com:

$$\beta = 9 \cdot H^{-0,5}$$

onde: H – altura do obstáculo, em m.

Para o exemplo a seguir, considerando a disposição de cabos típica de uma linha de transmissão de 500 kV e a incidência de descarga com corrente de crista I e ângulo θ , são apresentadas as zonas de captação de descargas (para fases, cabos pára-raios e solo) associadas à distância de salto $R_s(I)$ e a distância de exposição equivalente da LT (D_{EQ}). As distâncias D_{EQPR} e D_{EQFASE} , também indicadas na figura a seguir, referem-se às larguras de captação dos pára-raios e das fases, respectivamente, analisadas no Item 4.2.3. Cumpre observar que as distâncias D_{EQ} , D_{EQPR} e D_{EQFASE} são funções de I e θ .

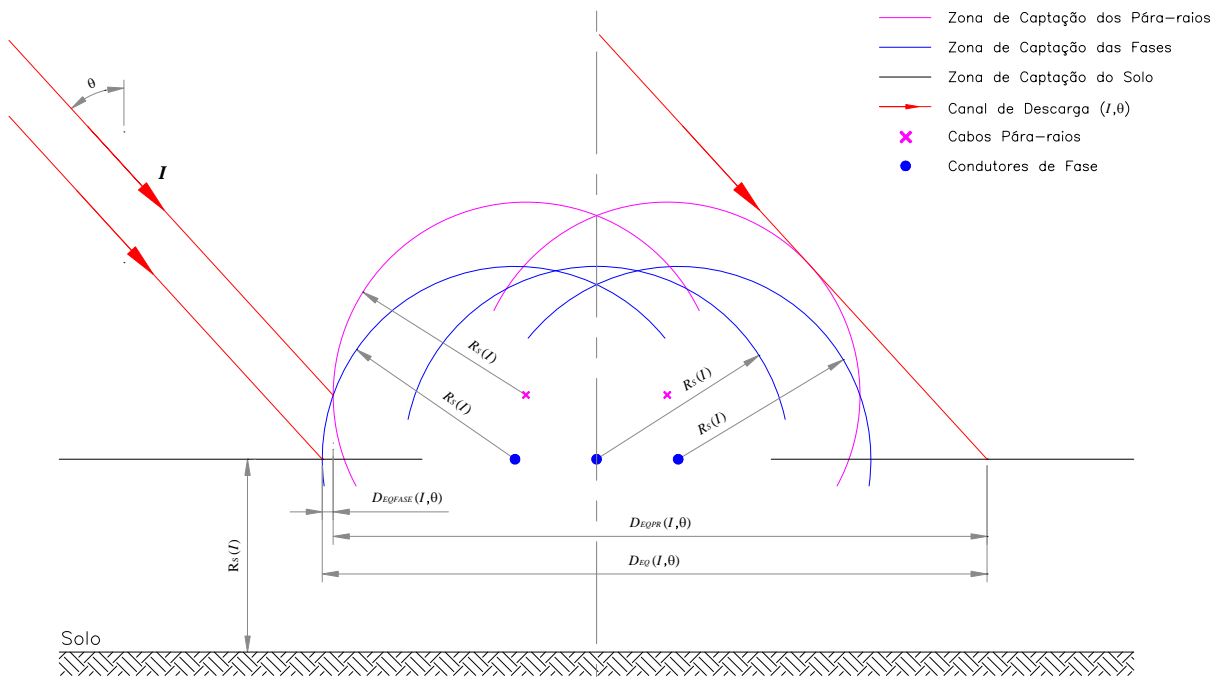


Figura 4.14 – Exemplo das zonas de captação de descargas e distâncias de exposição equivalente para uma configuração típica de uma LT 500 kV.

Uma vez determinada a distância equivalente em função da corrente $D_{EQ}(I)$, já contemplado o efeito probabilístico do ângulo de inclinação das descargas (θ) através da Equação 4-2, define-se o número de descargas captadas por comprimento de LT através do índice médio de descargas da região e ponderando-se com a distribuição estatística do valor de crista da corrente, de acordo com:

$$DESC_{LT} = N_D \cdot \int_0^{\infty} D_{EQ}(I) \cdot p(I) \cdot dI \quad \text{Equação 4-3}$$

sendo: $DESC_{LT}$ – número de descargas por unidade de comprimento captadas pela LT (descargas/km/ano);

N_D – número médio de descargas de uma região, obtido conforme Item 4.2.1 (descargas/km²/ano);

$D_{EQ}(I)$ – largura de captação em função da corrente de descarga, determinada através da Equação 4-2 (km);

$p(I)$ – densidade de probabilidade do valor de crista da corrente de descarga.

Cumpra observar que a função densidade de probabilidade do valor de crista da corrente de descarga é obtida segundo a distribuição log-normal, de acordo com os resultados de [42], indicados na Figura 4.1.

Procedimento similar ao descrito anteriormente pode ser aplicado em qualquer instalação, bastando apenas contemplar os efeitos específicos da geometria dos obstáculos para captação de descargas.

4.2.3 ANÁLISE DA LT SOB DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O modelo eletrogeométrico (EGLM) descrito no item anterior permite definir o número de descargas atmosféricas captadas pelas linhas de transmissão, considerando as características geométricas dos cabos, o comportamento dos fenômenos associados à incidência e as distribuições de probabilidade dos parâmetros de descarga. No entanto, para se analisar os efeitos provocados por estes surtos nas LT's faz-se necessário também avaliar os diferentes componentes da instalação a serem atingidos.

Observando as zonas de exposição, conforme apresentadas na Figura 4.14, constata-se que podem ocorrer incidências de descargas nos cabos pára-raios, nos condutores de fase ou no solo. Apesar de não estar claramente indicado na referida figura, é possível também atingir as estruturas. Na figura a seguir encontram-se esquematizadas as possibilidades de incidência.

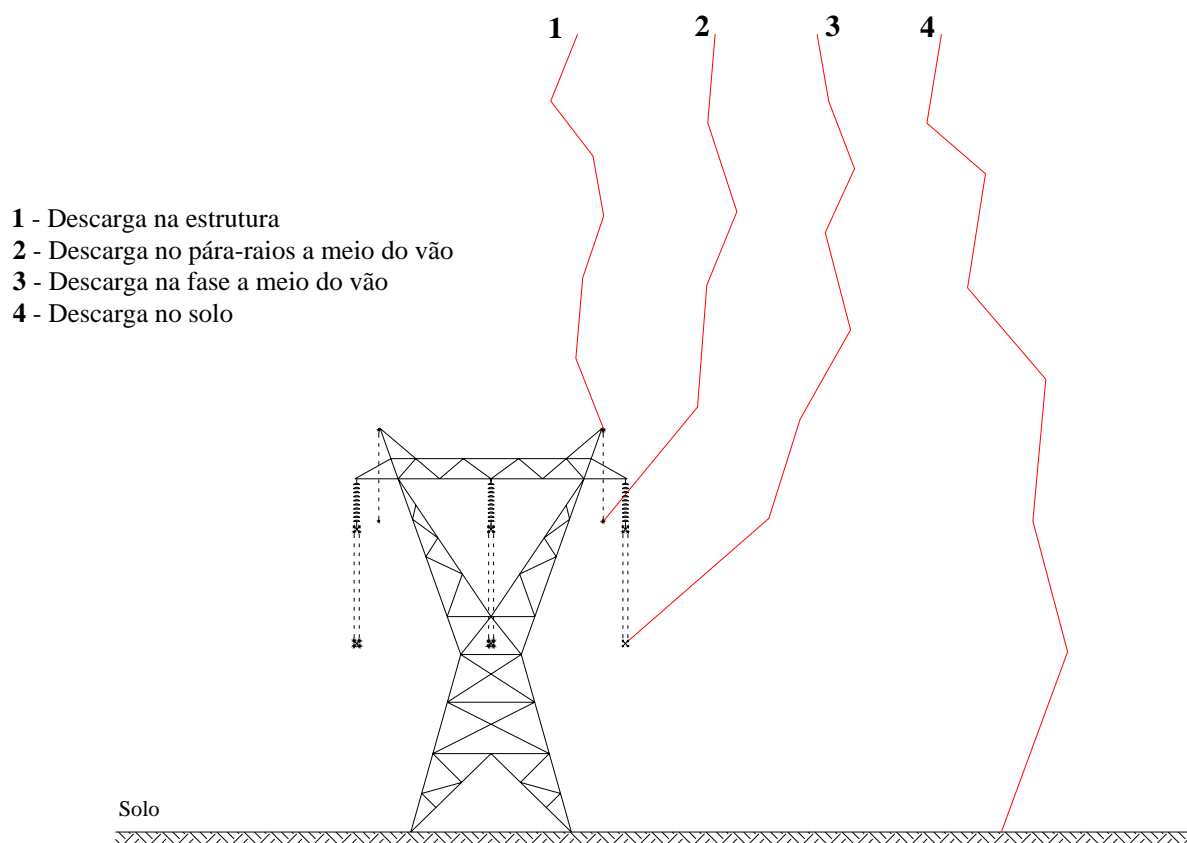


Figura 4.15 – Diagrama de incidência de descargas atmosféricas.

Incidência nos Cabos Pára-raios / Estruturas

A função dos cabos pára-raios numa LT é justamente blindar os condutores de fase contra a incidência de descargas diretas. O número de descargas captadas pelos cabos pára-raios é determinado de modo análogo ao descrito no Item 4.2.2, mas adotando a distância equivalente de exposição dos pára-raios (D_{EQPR}), indicada na Figura 4.14, em vez da largura total de captação da LT (D_{EQ}) nas Equação 4-2 e na Equação 4-3.

Todas as descargas que incidem tanto nas estruturas como nos pára-raios se propagam ao longo desses cabos e acabam por escoar para o sistema de aterramento das estruturas. Contudo, ao longo dessa propagação, os efeitos de atenuação tanto nas estruturas, devido à

Análise de Sistemas de Aterramento sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão.

parcela que flui para o solo, como nos próprios pára-raios, devido às perdas ôhmicas e por efeito corona, limitam a quantidade de estruturas a serem efetivamente afetadas pela descarga.

No que se refere ao desempenho da LT sob descargas atmosféricas, há de se considerar duas situações de incidência: a meio do vão e junto às estruturas. Em ambos os casos poderá ocorrer escorvamento entre condutor e pára-raios a meio do vão ou entre condutor e estrutura (através do espaçamento no ar ou da cadeia de isoladores) se estes isolamentos não forem suficientes para suportar a tensão aplicada sobre eles devido à propagação do surto atmosférico.

A tensão de escorvamento para isolamentos em ar apresenta uma característica estatística cuja distribuição de probabilidade pode ser tipicamente representada por uma gaussiana, sendo definido por $V_{0,5}$ a tensão que apresenta uma probabilidade de escorvamento de 50% e caracterizando-se normalmente um desvio quadrático médio de 2% de $V_{0,5}$, para solicitações provocadas por surtos atmosféricos (onda padronizada de 1,2/50 μ s). De acordo com [4,44], a tensão crítica de escorvamento corresponde à tensão $V_{0,5}$, que é calculada em função da distância de isolamento, da forma dos eletrodos e das condições meteorológicas (temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade absoluta do ar). Em [4] são apresentados em detalhes os procedimentos de cálculo destes parâmetros.

A corrente de descarga, ao se propagar pelo cabo pára-raios, provoca um surto de tensão no próprio pára-raios e também nas fases, devido ao acoplamento mútuo. Por sua vez, quando este impulso de corrente que se propaga pelo pára-raios atinge a estrutura, parte da corrente escoar para o solo, através do sistema de aterramento, e parte se propaga em direção ao vão seguinte. Neste processo, junto às estruturas, ocorre o fenômeno de reflexão, produzindo uma onda refletida no pára-raios cujo sentido de propagação e polaridade são contrários ao do pulso incidente e por isso causando um efeito atenuante no mesmo.

Em se tratando de incidências nos pára-raios a meio do vão ou junto às estruturas, considera-se que o escorvamento entre fase e pára-raios ou entre fase e estrutura ocorra quando a tensão entre esses elementos for superior à tensão crítica de escorvamento dos

referidos *gaps* ($V_{0,5}$). Em [4] é apresentada uma metodologia simplificada para cálculo destas tensões na LT, adotando constantes as impedâncias de onda próprias e mútuas entre cabos e a resistência de aterramento das estruturas, e obtendo de forma aproximada os coeficientes de reflexão junto às estruturas.

Cumprir observar que para se determinar corretamente estas tensões originadas pelos surtos atmosféricos, deve-se utilizar um modelo que represente, em função da frequência, as impedâncias dos cabos, das estruturas e dos sistemas de aterramento, incluindo os respectivos acoplamentos entre esses elementos. O modelo deve ainda contemplar, na propagação do surto, o efeito corona nos cabos e os fenômenos de reflexão. No que se refere às descargas, devem ser avaliadas a dependência estatística dos tempos de frente e dos valores de crista da corrente.

Incidência nos Condutores de Fase

Conforme já mencionado no início do item anterior, a blindagem oferecida pelos cabos pára-raios é determinada através das zonas de proteção indicadas na Figura 4.14. Contudo, para determinadas correntes máximas de descargas, as distâncias de salto podem colocar as fases sob exposição. O número de descargas que ocasionam falhas de blindagem na LT é determinado de modo análogo ao descrito no Item 4.2.2, mas adotando a largura de captação equivalente das fases (D_{EQFASE}), indicada na Figura 4.14.

Das descargas que incidem nas fases, considera-se que somente ocorra escorvamento entre fase e pára-raios ou entre fase e estrutura para aquelas que originam tensões entre esses elementos superiores à tensão crítica de escorvamento ($V_{0,5}$). Por isso, no que se refere às solicitações do sistema de aterramento e ao desempenho da LT, somente serão de interesse as descargas cujo valor de crista seja superior à corrente crítica de escorvamento (definida como a que origina tensão de $V_{0,5}$). Assim, o número de descargas que provocam curto-circuito na LT será determinado por:

$$DESC_{CCLT} = N_D \cdot \int_{I_{CRITICA}}^{\infty} D_{EQFASE}(I) \cdot p(I) \cdot dI$$

- sendo: $DESC_{CCLT}$ – número de descargas por unidade de comprimento captadas pelas fases e que provocam curto-circuito na LT (descargas/km/ano);
- N_D – número médio de descargas de uma região, obtido conforme Item 4.2.1 (descargas/km²/ano);
- $D_{EQFASE}(I)$ – largura equivalente de captação das fases em função da corrente de descarga, determinada através da Equação 4-2 (km);
- $p(I)$ – densidade de probabilidade do valor de crista da corrente de descarga, função obtida a partir da Figura 4.1 ;
- $I_{CRITICA}$ – corrente crítica a partir da qual são induzidas tensões superiores a crítica de escorvamento dos *gaps* ($V_{0,5}$).

Cumpra observar que para se determinar a corrente crítica originada pelos surtos atmosféricos, deve-se utilizar um modelo que represente, em função da frequência, as impedâncias dos cabos, das estruturas e dos sistemas de aterramento, incluindo os respectivos acoplamentos entre esses elementos e permitindo considerar o efeito corona nos cabos.

Incidência no Solo

Em se tratando de descargas que não atingem diretamente as linhas de transmissão, mas o solo na sua proximidade, o campo eletromagnético associado ao canal de descarga provoca indução nos cabos condutores, nos cabos pára-raios e no solo. Dessa forma, os surtos se propagam ao longo da LT solicitando os isolamentos e os sistemas de aterramento.

Através de um modelo que contemple dados estatísticos de altura do canal de descarga e velocidade de propagação da corrente, define-se a corrente máxima e o tempo de frente de onda que provocam tensões superiores à tensão crítica de escorvamento, para diferentes pontos de incidência no solo (distância à LT).

O número de descargas captadas no solo, na vizinhança da LT, é determinado de modo análogo ao apresentado no Item anterior, só que determinando exclusivamente a largura de captação do solo (excluindo as zonas de incidência dos cabos condutor e pára-raios), conforme indicado na Figura 4.14, considerando a distância da incidência da descarga à LT e ponderando-se os parâmetros estatísticos de tempo de frente e valor de crista da corrente.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS DE CAMPO REFERENTES À ANÁLISE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

A utilização de procedimentos experimentais tem a finalidade de fornecer elementos que permitam não só subsidiar a execução de projetos, mas também avaliar a conformidade quanto a critérios de desempenho ou até mesmo validar a consistência de modelagens físicas. Por isso, tanto os ensaios quanto tratamento dos resultados obtidos devem ser feitos criteriosamente e seguindo metodologias e processos que minimizem imprecisões e erros inerentes à medição.

De um modo geral as avaliações de campo aplicadas aos sistemas de aterramento são realizadas somente para o comportamento à frequência industrial, sendo mais comumente efetuadas as medições de resistividade do solo, resistência de aterramento e tensões induzidas no solo. Em [9] é apresentada uma pesquisa de metodologias e procedimentos empregados em ensaios desta natureza, considerando também os aspectos experimentais de medições em malhas de terra com subestações energizadas.

No que se refere ao desempenho transitório, se as análises computacionais já são dispensadas em grande parte dos projetos, conforme discutido em capítulos anteriores, quão mais os ensaios seriam considerados.

Este tipo de procedimento é completamente equivocado, pois a análise simplesmente à frequência industrial não é capaz de revelar o comportamento sob solicitações impulsivas, nem tampouco o atendimento aos critérios de projeto para 60 Hz (resistência de aterramento e tensões induzidas no solo) pode servir de pretexto para não se efetuar medições de campo associadas a tais solicitações. Essa postura adotada deve-se não somente às maiores dificuldades teóricas, computacionais e experimentais inerentes a esta avaliação transitória, mas principalmente a determinados conceitos simplistas que ainda se encontram impregnados no setor, como considerar surtos atmosféricos sendo fenômenos adversos e de pouca representatividade, e a normas incoerentes, que definem critérios de desempenho baseados na extrapolação incorreta do comportamento em baixas frequências.

Devido à importância dos ensaios de campo para uma coerente avaliação dos aterramentos, nos itens a seguir serão apresentadas metodologias para a medição das principais grandezas associadas ao desempenho transitório, que são os parâmetros elétricos do solo, σ e $\omega\epsilon$, e a impedância de aterramento, ambos em função da frequência.

5.1 PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO

Conforme já tratado no Capítulo 2, para analisar sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas, do tipo descargas atmosféricas, é necessário, no mínimo, obter o comportamento dos mesmos para frequências de até no mínimo 1 a 2 MHz. Como os parâmetros elétricos do solo exercem influência significativa neste comportamento, é fundamental que a sua modelagem em função da frequência seja fisicamente coerente e representativa do solo no local de interesse. Isto é obtido a partir da aplicação criteriosa de modelos consistentes a resultados experimentais de ensaios de campo.

No entanto, para que estes resultados experimentais apresentem confiabilidade, as medições precisam ser realizadas segundo metodologias específicas que minimizem erros e interferências inerentes ao ensaio. Por isso, neste item é apresentada uma compilação dos principais procedimentos experimentais descritos em [6-7] e utilizados em [48]. A metodologia descrita é indicada para solos consistentes do tipo argiloso ou arenoso, que são os tipos comumente encontrados no país. Contudo, para solos rochosos ou com elevada porosidade são indicados outros procedimentos [6-7] semelhantes a este.

As medições devem ser realizadas em amostras de solo que são retiradas do local de análise sob a forma de paralelepípedo de dimensões da ordem de 0,25 x 0,25 x 1,0 m, conforme indicado na Figura 5.1.

O procedimento para extração da amostra consiste em se escavar uma área de aproximadamente 1,0 x 2,0 m e ao se atingir uma profundidade entre 0,5 e 1,0 m, escavar ao redor de forma a esculpir no centro um paralelepípedo com as dimensões mencionadas. Como é fundamental preservar a integridade física da amostra, a sua retirada deve ser cuidadosamente executada. Por isso, recomenda-se envolver o paralelepípedo com uma tela de nylon, acondicionar uma caixa de madeira (inicialmente sem fundo e sem tampa) sobre

o mesmo e adicionar parafina líquida de forma a preencher todo o espaço intersticial. Após tampar a caixa, deve-se cortar a parte inferior do paralelepípedo para “desprendê-lo” do solo e, cautelosamente, girar a caixa para que a parte cortada fique voltada para cima, preenchendo em seguida o restante com parafina.

A utilização deste processo serve não somente para preservar a amostra durante a sua retirada, mas também para conservar a umidade e o grau de compactação do solo. Isto porque o ensaio geralmente não é realizado no mesmo local de onde a amostra foi extraída e durante o transporte a mesma pode sofrer algum dano ou até mesmo um processo de ressecamento.

No que se refere à profundidade de 0,5 a 1,0 m para retirada da amostra, ela tem a finalidade de eliminar as influências de vegetações e de possíveis alterações na camada superficial do solo. Quanto às dimensões sugeridas, as mesmas foram definidas de modo a minimizar os efeitos de borda e também não dificultar demasiadamente o processo de retirada do solo. Pequenas variações nestes valores não causam problemas ao ensaio. Em [6-7] é sugerida uma dimensão de 0,2 x 0,2 x 1,2 m.

Para realizar a medição, deve-se retirar a face superior e as duas faces laterais da caixa de madeira, removendo também a tela de nylon e a parafina com cuidado para não danificar a amostra. Nas faces laterais são inseridas duas placas metálicas de área A (Eletrodos de Corrente) e sobre a face superior são instaladas duas hastes metálicas finas (Eletrodos de Tensão) com uma distância d entre elas, conforme indicado na figura a seguir:

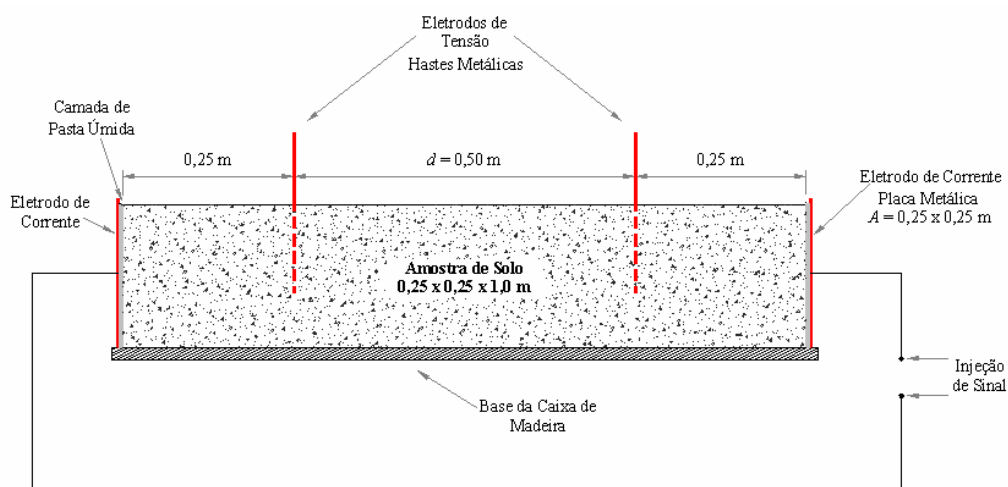


Figura 5.1 - Preparação da amostra do solo para medição.

De modo a minimizar as imperfeições das faces da amostra e melhorar o contato elétrico com as placas metálicas, recomenda-se inserir entre estas superfícies uma fina camada de pasta úmida formada a partir do solo peneirado retirado do local da escavação. As placas devem ser firmemente fixadas às faces da amostra e precisam ser de um metal cujo processo de oxidação não prejudique o contato elétrico, como o cobre.

O ensaio consiste em se aplicar aos eletrodos de corrente, sinais senoidais numa faixa de 100 Hz a 2 MHz, considerando três a quatro frequências por década. Para cada frequência, deve-se medir a corrente injetada na amostra e a tensão entre os eletrodos. Como as medições são feitas por intermédio de um osciloscópio digital, a corrente será obtida através da tensão no resistor “shunt”, o qual deve apresentar um comportamento puramente resistivo para o espectro do ensaio. O esquema de interligação dos equipamentos e os sinais a serem medidos são apresentados na Figura 5.2.

O sinal de tensão ($V_{E1}-V_{E2}$) é determinado diretamente no osciloscópio através da diferença entre os sinais aquisitados pelos canais CH1 e CH2. Por sua vez, o sinal de corrente é obtido a partir do sinal do canal CH3 (V_R), dividindo-se a amplitude medida pela resistência “shunt”. A razão entre as amplitudes dos sinais de tensão e corrente corresponde numericamente ao módulo da impedância da amostra, enquanto que a defasagem entre esses sinais especifica a fase dessa impedância.

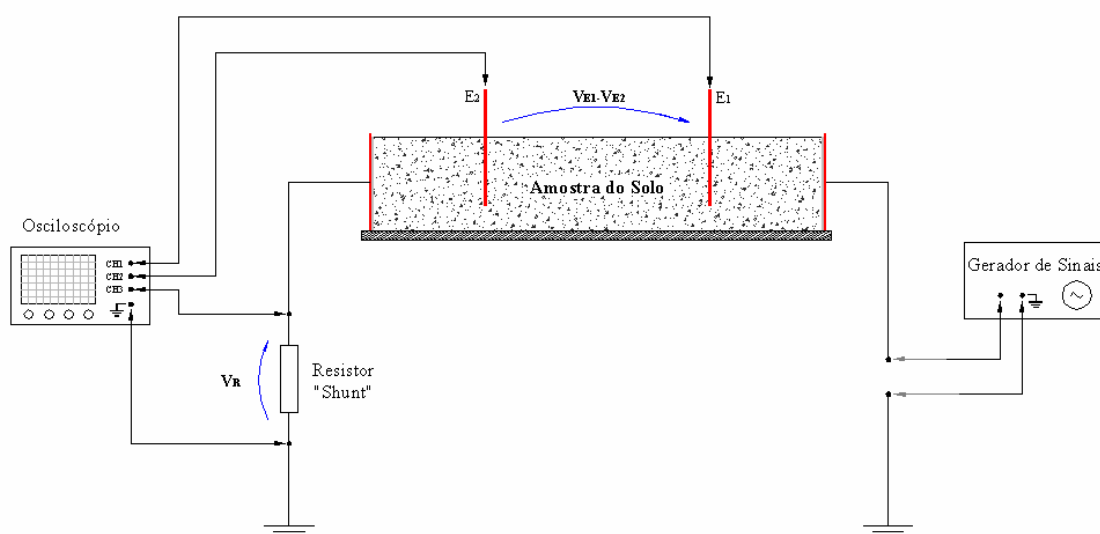


Figura 5.2 – Arranjo para medição dos parâmetros σ e $\omega\epsilon$ da amostra.

Como a modelagem elétrica do solo para a faixa de frequência analisada pode ser representada por uma admitância equivalente do tipo $\sigma + j\omega\epsilon$, conforme descrito no Item 2.4, e sabendo-se que a admitância da amostra corresponde ao inverso da impedância medida, determina-se a condutividade σ e a susceptância $\omega\epsilon$, para cada frequência, através das seguintes equações:

$$\sigma = \operatorname{Re}[Y] \cdot \frac{d}{A} \quad \text{e} \quad \omega\epsilon = \operatorname{Im}[Y] \cdot \frac{d}{A}$$

sendo: Y – admitância medida para cada frequência, em S;

d – distância entre os eletrodos de tensão, em m;

A – área da seção transversal da amostra, em m².

O comportamento dos parâmetros elétricos do solo em função da frequência é obtido a partir dos pontos medidos, conforme apresentado no Item 2.4, através da interpolação de funções fisicamente coerentes e utilizando critérios de validação com base em análises estatísticas [6-7].

5.2 IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

As principais aplicações deste ensaio consistem na validação da modelagem física utilizada nas simulações computacionais, verificação dos critérios construtivos dos sistemas de aterramento e avaliação de alguns parâmetros considerados nas simulações computacionais, como as características elétricas do solo em função da frequência e a segmentação dos condutores.

Diferentes metodologias têm sido utilizadas para avaliar a resposta transitória dos aterramentos. As mais utilizadas baseiam-se na injeção de uma corrente impulsiva e na medição da tensão dos mesmos [24,49,50]. O sinal de corrente do tipo dupla exponencial, proveniente de um circuito de disparo de dupla constante de tempo, é medido através de um “shunt” resistivo, enquanto a tensão do aterramento é obtida em relação a um eletrodo aterrado num local distante, cuja tensão no solo seja desprezível. Como os sinais são adquiridos no domínio do tempo, a resposta em frequência é calculada através da aplicação da Transformada de Fourier.

Análise de Sistemas de Aterramento sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão.

Em [51] é apresentado um procedimento semelhante ao anterior, mas diferenciando-se por utilizar descargas atmosféricas como fontes de corrente. As descargas são forçadamente disparadas e captadas por um foguete especial, que estabelece um canal precursor através de um fio conectado ao mesmo. Um circuito permite injetar esta corrente no aterramento e medi-la através de um “shunt” resistivo. Os sinais de corrente e tensão são obtidos através de oscilografia.

No entanto, alguns métodos são muito sensíveis a interferências e, de acordo com a forma de onda do sinal injetado, podem apresentar frequências numa faixa do espectro que não são representativas dos surtos de interesse, além do que os sinais podem sofrer atenuações e distorções ao se propagarem pelos cabos. Outro aspecto está no fato de certos tipos de ensaios exigirem equipamentos sofisticados e condições especiais tanto para gerar como para medir os sinais, tornando-os exequíveis somente em laboratórios especializados.

Devido a estes problemas, procurou-se adotar um método que fosse robusto, menos susceptível a estas influências e com boa exequibilidade experimental em campo. Os procedimentos apresentados resultam de uma compilação de experiências relatadas em [52], de ensaios de campo realizados em diversas subestações e de estudos realizados [48].

A metodologia adotada consiste na determinação da resposta em frequência dos aterramentos, considerando a aplicação de sinais senoidais. O princípio se baseia na injeção de uma corrente, através de um eletrodo auxiliar (eletrodo de corrente), e na medição da tensão deste sistema com relação à *terra remota*, por intermédio de outro eletrodo auxiliar (eletrodo de tensão). Os circuitos para injeção de corrente e medição da tensão e os respectivos eletrodos de corrente (C) e de tensão (V) são apresentados no diagrama esquemático da figura a seguir.

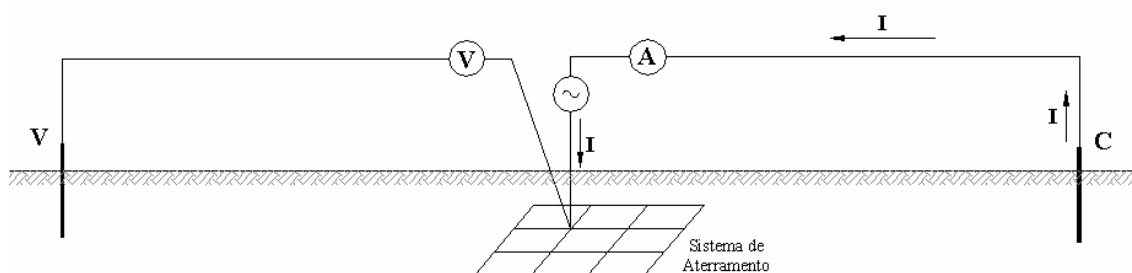


Figura 5.3 – Diagrama esquemático da medição do aterramento.

O termo *terra remota* é utilizado para caracterizar uma região no solo onde os campos eletromagnéticos originados pela corrente que escoia para o solo através de um sistema aterramento são desprezíveis. Teoricamente esta região se encontra no infinito, em termos práticos ela pode ser definida utilizando critérios de aproximação suficientemente adequados.

Dessa forma, no que se refere à localização dos eletrodos auxiliares, os mesmos devem ser posicionados numa região onde seja possível caracterizar por remota. Esta condição pode ser obtida através da simulação preliminar do sistema em causa, determinando-se a partir de que distância do mesmo tem-se uma tensão¹ induzida no solo inferior a um valor desejado. Para isso, é de grande utilidade utilizar a análise à frequência industrial e definir como critério um local na qual esta tensão seja inferior a 10% da tensão¹ do aterramento.

Considerando este pressuposto e observando as precauções no que se refere a outros erros associados ao procedimento experimental, tem-se uma medição cujo erro é da ordem de grandeza de 10%. Com o aumento da frequência do sinal injetado, os erros associados a esta tensão reduzem-se devido ao maior efeito atenuante da propagação no solo. Isto pode ser demonstrado a partir da análise da Equação A-8, rerepresentada a seguir, que determina o potencial escalar num meio uniforme e homogêneo originado por uma fonte pontual de injeção de corrente no meio em causa, com frequência de pulsação $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ e representada na forma complexa por $I_T = i_T e^{\mp i \omega t}$.

$$\psi = \frac{I_T}{4 \pi (\sigma \mp i \omega \varepsilon)} \frac{e^{i k r}}{r};$$

sendo: r - distância com relação à fonte, em m;

$\sigma, \omega \varepsilon$ - parâmetros do solo, em S/m;

k - coeficiente de propagação no solo: $k = \sqrt{\mu \varepsilon \omega^2 \pm i \omega \mu \sigma}$;

μ - permeabilidade magnética do solo, em H/m;

¹ Tensão esta definida com relação a um ponto infinitamente afastado.

Como se pode observar na equação anterior, quanto maior a frequência maior a atenuação do potencial escalar, ainda mais se for considerado o comportamento dos parâmetros σ e $\omega\epsilon$ do solo, que é crescente com a frequência, conforme analisado no Item 2.4.

Em contrapartida, esta elevação da frequência provoca o aumento do campo elétrico associado ao potencial vetor (\vec{A}), tratado no Anexo A, que é originado pela corrente longitudinal dos condutores do sistema de aterramento e do cabo do circuito de injeção de corrente. Por isso, no que se refere às influências deste efeito na medição em causa, a elevação da frequência torna mais pronunciado o efeito do acoplamento entre condutores do aterramento e cabos dos circuitos de medição.

Dessa forma, o que se mede propriamente neste ensaio não é a impedância de aterramento, mas sim a razão entre a tensão do sistema de aterramento com relação a um ponto no solo (onde se encontra o eletrodo V) e a corrente injetada através do circuito de corrente. A verificação dos resultados obtidos neste ensaio deve ser feita através de simulações computacionais considerando tanto o sistema de aterramento como os circuitos de medição.

Como apresentado no Anexo A, o campo elétrico originado por estas fontes apresenta a mesma direção do eixo axial do elemento condutor destas correntes. Por isso, para reduzir o efeito do acoplamento entre os circuitos de medição deve-se posicionar os eletrodos de forma que os cabos fiquem perpendiculares entre si. Em se tratando do acoplamento com os condutores do aterramento, recomenda-se minimizar o comprimento de cabo do circuito de tensão próximo aos mesmos e, quando possível, posicioná-lo perpendicularmente ao maior número de condutores.

No que se refere aos equipamentos e aos aspectos experimentais do ensaio, deve ser utilizado um gerador de funções para a injeção dos sinais em diferentes frequências e um osciloscópio digital para realizar as medições da corrente injetada e da tensão do sistema. A corrente será obtida através de um resistor “shunt” do tipo não indutivo. Na figura a seguir é apresentado o esquema de interligação dos equipamentos:

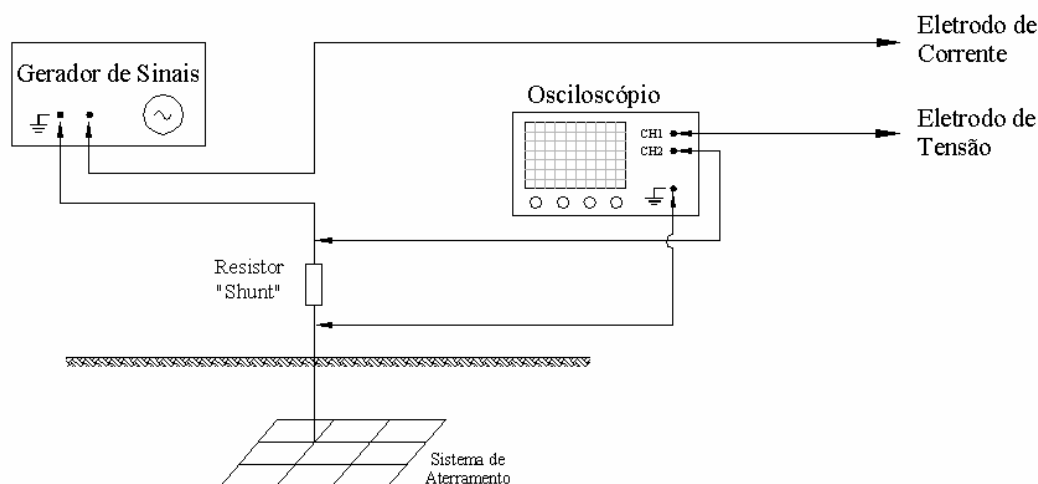


Figura 5.4 – Esquema de interligação dos equipamentos.

Como pode ser observado na figura, a tensão é adquirida através do canal CH1 e o sinal de corrente obtido no canal CH2, dividindo sua amplitude pelo valor da resistência “shunt”. Para que as interligações não coloquem o gerador de funções e o osciloscópio em curto-circuito, é necessário que a alimentação dos mesmos seja realizada por geradores independentes.

A razão entre a amplitude dos sinais de tensão e de corrente é numericamente igual ao módulo da impedância entre os pontos de medição, enquanto que a defasagem entre esses sinais especifica a fase dessa impedância. Os ensaios devem ser realizados aplicando-se sinais numa faixa de 100 Hz a 2 MHz, considerando três a quatro frequências por década, aproximadamente equidistantes em escala logarítmica.

Caso sejam realizadas medições estando os aterramento sujeitos à circulação de correntes à frequência industrial ou de ordem superior, é imprescindível utilizar determinadas funções tipicamente existentes em osciloscópios digitais como a filtragem de ruídos e a análise dos sinais no domínio da frequência através da função FFT (“Fast Fourier Transform”), que permitem discriminar tanto o sinal injetado como as interferências presentes no aterramento. De qualquer forma, para evitar possíveis interpretações incorretas é conveniente avaliar e quantificar as correntes que circulam antes de se iniciar as medições.

5.3 APLICAÇÃO DOS ENSAIOS EM UM CASO EXEMPLO

De modo a exemplificar a aplicação dos procedimentos experimentais e metodologias descritos neste capítulo, são apresentados neste item os ensaios de campo realizados em [48]. No que se refere à análise transitória, foram executadas medições dos parâmetros elétricos do solo e da impedância do aterramento com relação a um determinado ponto no solo. Devido às dificuldades para se realizar o ensaio dos parâmetros do solo no local dos trabalhos, optou-se por recolher a amostra do solo e efetuar os experimentos posteriormente em laboratório. O ensaio de impedância foi realizado em três diferentes configurações de sistemas, discriminadas no item a seguir.

Com o objetivo de aferir a coerência destes ensaios em baixas frequências, julgou-se conveniente executar também as medições de resistividade do solo e resistência de aterramento, que são tipicamente empregadas na análise à frequência industrial.

5.3.1 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMA DE ATERRAMENTO

As configurações de sistemas de aterramento utilizadas nos ensaios foram definidas a partir do tipo comumente utilizado em estruturas de linhas de transmissão, composto por quatro cabos contrapeso dispostos radialmente e conectados à estrutura.

Configuração 1

Esta configuração corresponde a um único cabo contrapeso. Embora não seja utilizada, é interessante observar isoladamente o comportamento de um cabo.

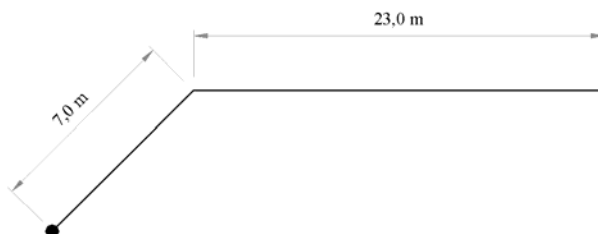


Figura 5.5 – Configuração 1.

Configuração 2

Esta é a configuração mais utilizada nos sistemas de aterramento de estruturas autoportantes. Embora os cabos contrapeso não sejam interligados num ponto central, mas às pernas da estrutura, a impedância de aterramento não sofre alterações significativas, uma vez que há interligação através das ferragens da estrutura.

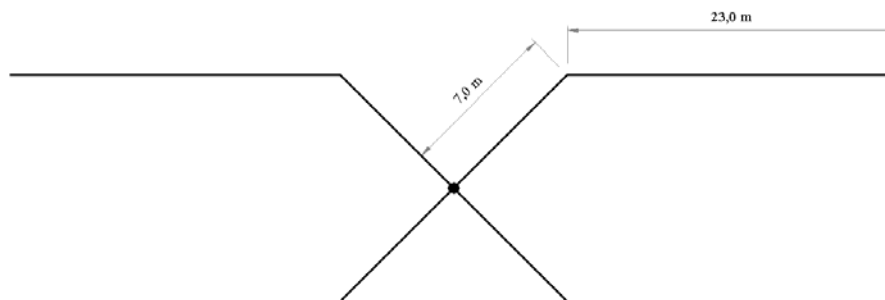


Figura 5.6 – Configuração 2.

Configuração 3

Este arranjo corresponde a uma alternativa para se melhorar o desempenho sob impulsos, principalmente nos casos onde o solo apresenta baixa condutividade.

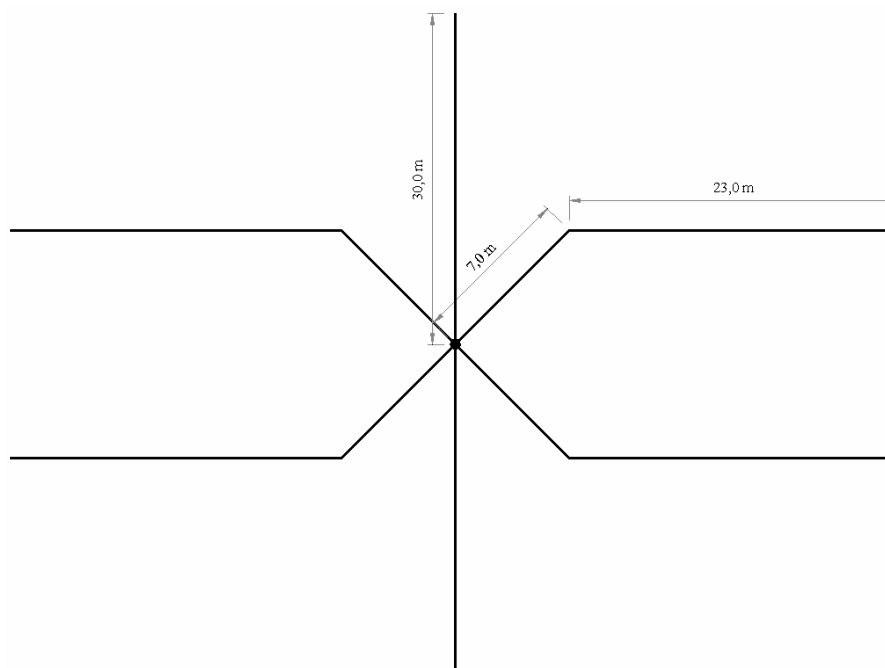


Figura 5.7 – Configuração 3.

No que se refere aos aspectos construtivos, foram adotados os seguintes procedimentos para se otimizar a instalação e a execução dos ensaios:

- O ponto de interligação central, apesar de não ser comumente utilizado em estruturas autoportantes, facilita a conexão dos cabos contrapeso e a injeção dos sinais para medição. E de forma global, não afeta o comportamento do aterramento;
- A instalação dos cabos foi realizada em fases de modo que a Configuração 3 fosse complementar à Configuração 2, e por conseguinte à Configuração 1, conforme indicado na Figura 5.8.
- De modo a reduzir o volume de escavação para a confecção das cavas, todos os cabos foram instalados a uma profundidade de aproximadamente 0,3 m;
- O comprimento de 30 m para todos os cabos foi adotado devido ao limite da área para instalação.

Em todas as configurações utilizou-se o cabo de aço galvanizado 3/8” – 7 fios, que apresenta um diâmetro de 9,14 mm.

A figura a seguir apresenta o posicionamento do sistema de aterramento e a instalação progressiva de cada fase para compor as Configurações 1, 2 e 3.

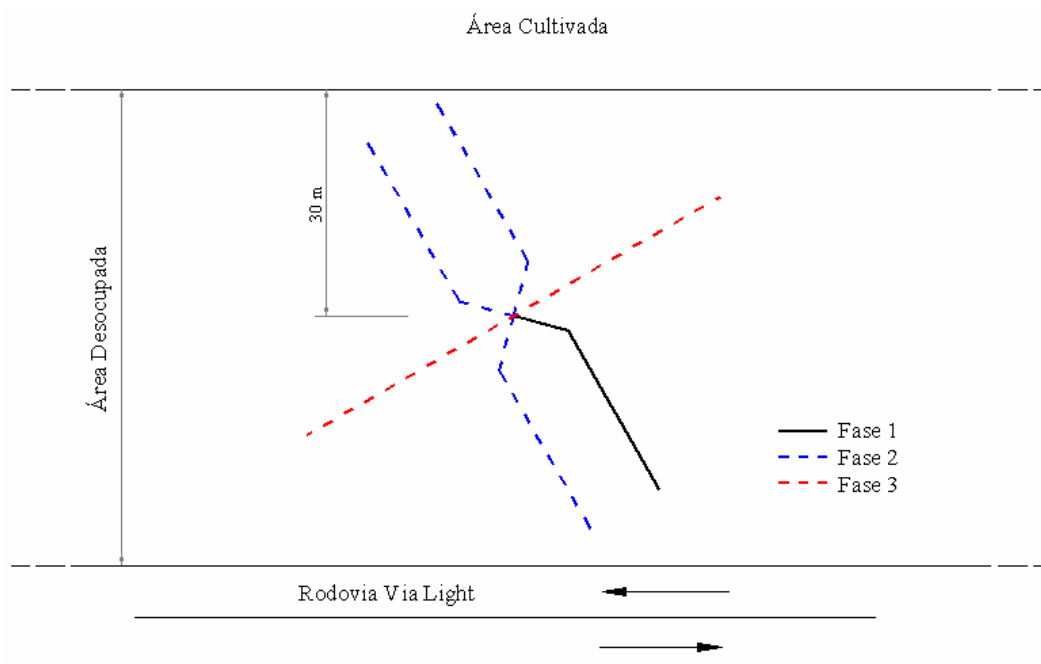


Figura 5.8 – Disposição dos cabos e instalação progressiva das fases.

5.3.2 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO

Uma análise prévia do solo, através de escavações em diferentes pontos na vizinhança da instalação, revelou que o mesmo era do tipo argiloso e apresentava-se úmido, tendo características uniformes ao longo da área analisada. Por isso, julgou-se conveniente realizar os ensaios em apenas uma amostra do solo, que foi retirada da vizinhança do ponto central do sistema de aterramento.

Dessa forma, seguindo os procedimentos experimentais e as metodologias apresentadas no Item 5.1, foram obtidos os resultados apresentados na tabela a seguir:

Frequência (Hz)	V _{Resistor} (mVpp)	V _{E1} - V _{E2} (Vpp)	Defasagem (μs)	Admitância (10 ⁻³ S)	Defasagem (°)	ω (rad/s)	σ (μS/m)	ωε (μS/m)
1 E+2	360	10,40	0	0,3472	0	6,28E+2	2778	0
2 E+2	362	10,40	0	0,3491	0	1,26E+3	2793	0
5 E+2	366	10,40	12,00	0,3530	2,16	3,14E+3	2822	106
1 E+3	370	10,45	6,00	0,3551	2,16	6,28E+3	2839	107
2 E+3	378	10,55	4,00	0,3594	2,88	1,26E+4	2871	144
5 E+3	390	10,60	2,40	0,3690	4,32	3,14E+4	2944	222
1 E+4	404	10,60	2,00	0,3823	7,20	6,28E+4	3034	383
2 E+4	420	10,50	1,30	0,4012	9,36	1,26E+5	3167	522
5 E+4	460	10,50	0,72	0,4394	12,96	3,14E+5	3426	788
1 E+5	502	10,45	0,48	0,4818	17,28	6,28E+5	3681	1145
2 E+5	564	10,25	0,35	0,5519	25,20	1,26E+6	3995	1880
5 E+5	684	9,50	0,18	0,7222	32,40	3,14E+6	4878	3096
1 E+6	848	8,60	0,10	0,9890	36,00	6,28E+6	6401	4651
2 E+6	1084	7,64	0,06	1,4231	41,76	1,26E+7	8492	7583

Tabela 5.1 – Resultados obtidos na medição dos parâmetros do solo.

Conforme tratado no Item 2.4, a partir destes valores e utilizando o método dos mínimos quadrados determinaram-se os seguintes parâmetros σ_0 , Δ_i , α da função que representa o comportamento de σ e $\omega\epsilon$ com a frequência:

$$W(f) = \sigma + j\omega\epsilon = \sigma_0 + \Delta_i \cdot \left(\cot \text{ang} \left(\frac{\pi}{2} \alpha \right) + j \right) \cdot (f \cdot 10^{-6})^\alpha$$

sendo : $\sigma_0 = 2,78 \times 10^{-3}$ S/m;

$\Delta_i = 4,65 \times 10^{-3}$ S/m;

$\alpha = 0,60$.

O gráfico a seguir apresenta os pontos medidos e o comportamento da função anteriormente apresentada:

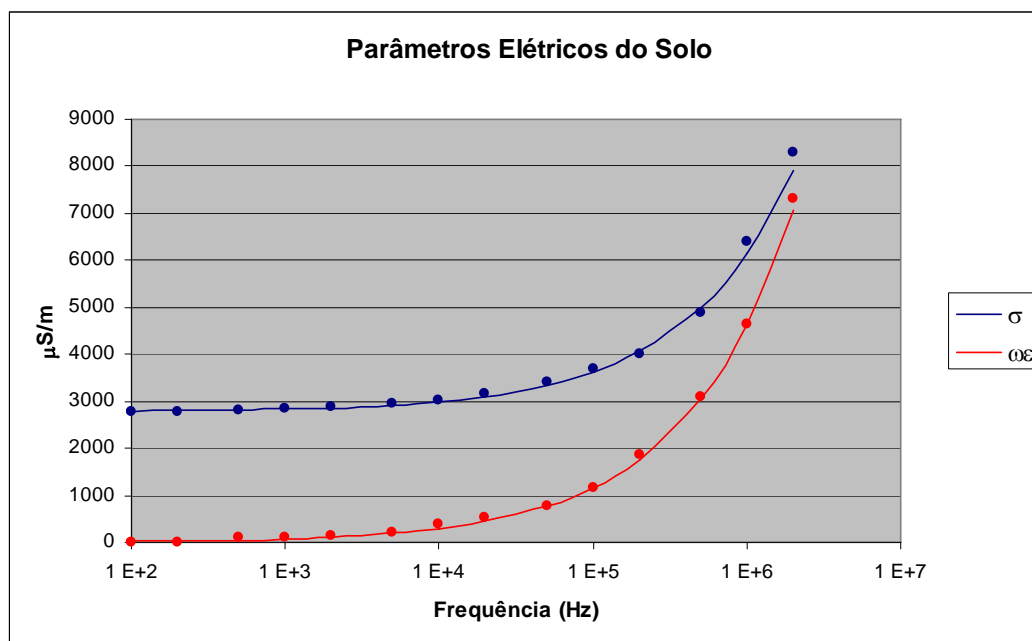


Figura 5.9 – Comportamento dos parâmetros elétricos do solo em função da frequência.

5.3.3 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

De modo a aferir o comportamento da condutividade do solo em baixas frequências, julgou-se conveniente realizar a medição de resistividade do solo utilizando o método de Wenner, descrito em detalhes em [9]. Este é o método amplamente adotado em medições desta natureza devido a sua praticidade e robustez.

Utilizou-se a configuração dos quatro eletrodos alinhados e equidistantes entre si, conforme apresentado na Figura 5.10. O princípio deste ensaio se baseia na injeção de corrente no solo através dos eletrodos externos (eletrodos de corrente) e na medição da tensão entre os eletrodos internos (eletrodos de tensão). A razão entre essas duas grandezas corresponde à resistência aparente do solo (R_a), associada à distância a entre eletrodos.

Os ensaios foram realizados com um medidor de resistência de terra, que é um equipamento específico para este tipo de experimento. Ele faz a injeção de corrente e a medição da tensão, fornecendo diretamente a leitura da resistência aparente.

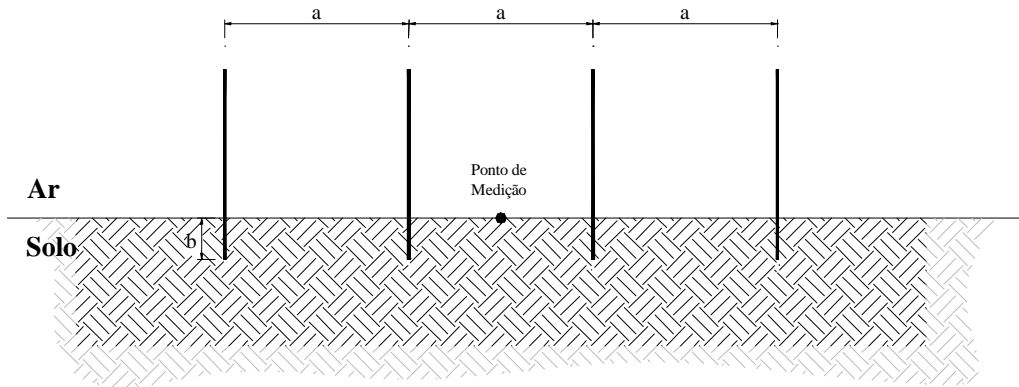


Figura 5.10 – Método de Wenner para medição da resistividade do solo.

Dessa forma, a partir dos valores de R_a obtidos para diferentes espaçamentos entre eletrodos (a) e considerando as dimensões envolvidas na medição, pode-se determinar a resistividade aparente do solo (ρ_a) através da seguinte equação:

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_a$$

A Figura 5.1 a seguir apresenta a localização dos dois pontos de medição, A e B, e as respectivas direções dos eixos. Cumpre observar que os cabos contrapeso indicados servem apenas para ilustrar o posicionamento dos pontos, pois eles somente foram instalados após a realização deste ensaio para não causar interferências.

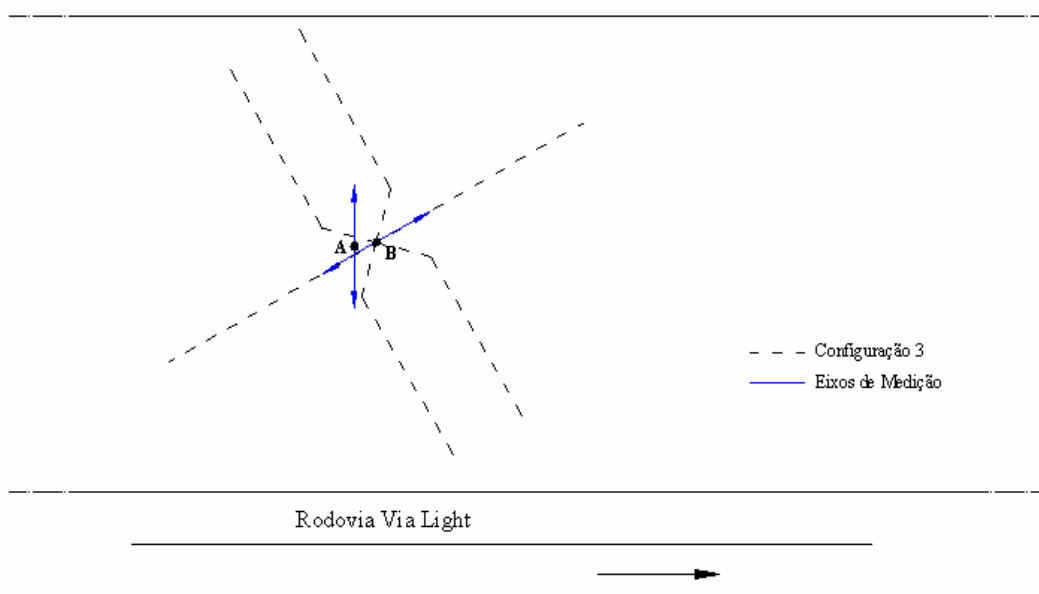


Figura 5.11 – Localização dos pontos e eixos de medição da resistividade do solo.

As medições foram realizadas para distâncias entre eletrodos a de 1, 2, 4, 8, 16 e 20 m. cumpre observar que a distância máxima de 20 m foi limitada pela área disponível para o ensaio. Os resultados obtidos são apresentados na tabela a seguir:

Distancia entre Eletrodos (m)	Resistencia Medida (Ω)		Coeficiente $2*\pi*a$	Resistividade Obtida ($\Omega.m$)		Resistividade Média ($\Omega.m$)
	Ponto A	Ponto B		Ponto A	Ponto B	
1	63,8	49,7	6,28	401	312	357
2	37,7	22,2	12,57	474	279	376
4	15,52	12,20	25,13	390	307	348
8	6,12	5,60	50,27	308	281	295
16	2,30	2,20	100,53	231	221	226
20	1,70	1,50	125,66	214	188	201

Graficamente, tem-se:

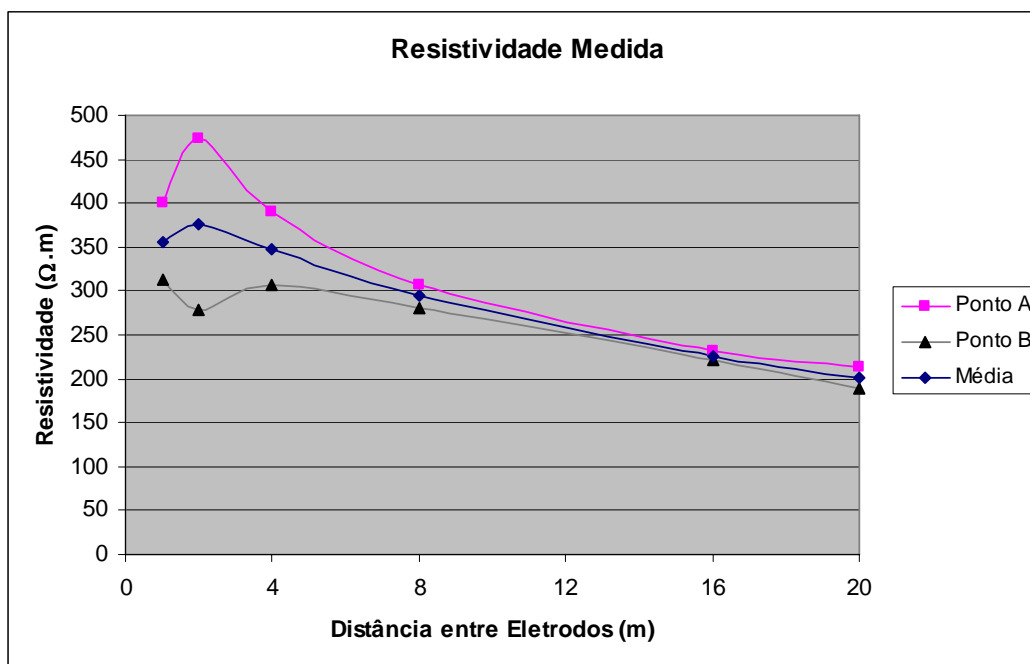


Figura 5.12 – Valores obtidos na medição de resistividade do solo.

Analisando o comportamento dos valores obtidos e considerando a média das medições, pode-se modelar a resistividade do solo próximo à superfície (associada às medições com espaçamentos entre eletrodos de 1 e 2 m) em aproximadamente $370 \Omega.m$. Cabe ressaltar que as medições indicam a possibilidade de se representar o solo através de um modelo composto por camadas horizontais de diferentes resistividades. Contudo, os resultados apresentados não permitem definir uma estratificação precisa, principalmente nas camadas

profundas. Para isto, haveria de se dispor de medidas com espaçamentos entre eletrodos maiores (até cerca de 100 m) e de um número maior de pontos medidos.

5.3.4 ENSAIO DE IMPEDÂNCIA

Após concluir as medições de resistividade do solo, iniciou-se a instalação dos sistemas de aterramento a partir da Configuração 1. Como as configurações foram definidas para serem complementares, somente após a finalização dos ensaios em determinada configuração é que se prosseguia à instalação da seguinte.

O posicionamento dos eletrodos de corrente e tensão foi definido através de simulações computacionais à frequência industrial considerando a Configuração 3, onde se determinou a partir de que distância do ponto central do aterramento se haveria teoricamente uma tensão¹ induzida no solo inferior a 10% da tensão¹ do aterramento. Dessa forma, tem-se um erro de medição associado à localização dos eletrodos da ordem de 10%, em baixas frequências, e que decresce exponencialmente com o aumento da frequência, como tratado no Item 5.2.

Cumprir observar que a Configuração 3 foi escolhida por ser a mais ramificada das três e, conseqüentemente, apresentar maior influência no solo, o que contribui de forma conservativa para a escolha do posicionamento dos eletrodos. Por isso, para as demais configurações tem-se um erro inferior ao obtido com esta configuração.

Além disso, para definir o posicionamento dos eletrodos foram considerados também os efeitos dos acoplamentos com os cabos do sistema de aterramento e entre os circuitos de corrente e tensão. Para minimizar a indução provocada pelo aterramento, procurou-se posicionar os circuitos o mais afastado e inclinado dos cabos contrapeso. Quanto ao acoplamento entre circuitos, instalou-os perpendicularmente entre si.

Dessa forma, estabeleceu-se a localização dos eletrodos de corrente (C) e tensão (V) apresentada na figura a seguir. Cumprir observar que as fases foram instaladas progressivamente, conforme já apresentado na Figura 5.8.

¹ Tensão esta definida com relação a um ponto infinitamente afastado.

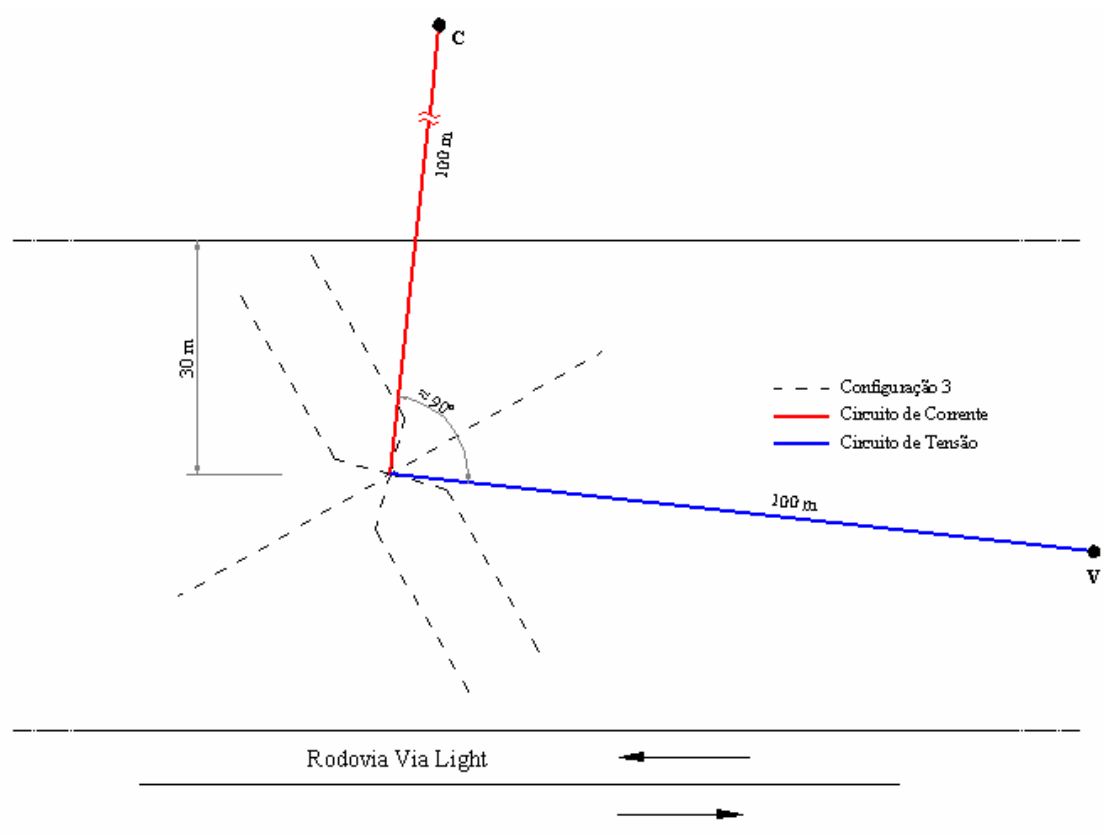


Figura 5.13 – Localização dos circuitos de corrente e tensão.

No entanto, antes de aplicar os sinais para determinação da impedância, procurou-se realizar a medição da resistência de aterramento à frequência industrial, a fim de aferir o comportamento em baixas frequências. Estes ensaios são descritos no Item 5.3.5.

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos para cada configuração.

Configuração 1

Para esta configuração têm-se os seguintes resultados:

Frequência (Hz)	V _{Resistor} (Vpp)	V _{Eletrodo} (Vpp)	Defasagem (μs)	ω (rad/s)	Impedância (Ω)	Defasagem (°)	Real(Z) (Ω)	Imag(Z) (Ω)
1 E+2	1.420	3.440	0	6.28E+02	24.2	0	24.23	0
2 E+2	1.420	3.280	0	1.26E+03	23.1	0	23.10	0
5 E+2	1.440	3.280	0	3.14E+03	22.8	0	22.78	0
1 E+3	1.420	3.200	0	6.28E+03	22.5	0	22.54	0
2 E+3	1.420	3.200	0	1.26E+04	22.5	0	22.54	0
5 E+3	1.420	3.120	0	3.14E+04	22.0	0	21.97	0
1 E+4	1.320	3.120	1.60	6.28E+04	23.6	5.76	23.52	2.37
2 E+4	1.400	3.120	1.60	1.26E+05	22.3	11.52	21.84	4.45
5 E+4	1.300	3.440	0.90	3.14E+05	26.5	16.20	25.41	7.38
1 E+5	1.160	6.32	-0.36	6.28E+05	54.5	-12.96	53.09	-12.22
2 E+5	0.900	2.92	-1.18	1.26E+06	32.4	-84.96	2.85	-32.32
5 E+5	0.680	1.20	-0.73	3.14E+06	17.6	-131.40	-11.67	-13.24
1 E+6	0.760	2.52	-0.79	6.28E+06	33.2	-284.40	8.25	32.12

Tabela 5.2 – Valores obtidos para a Configuração 1.

Graficamente:

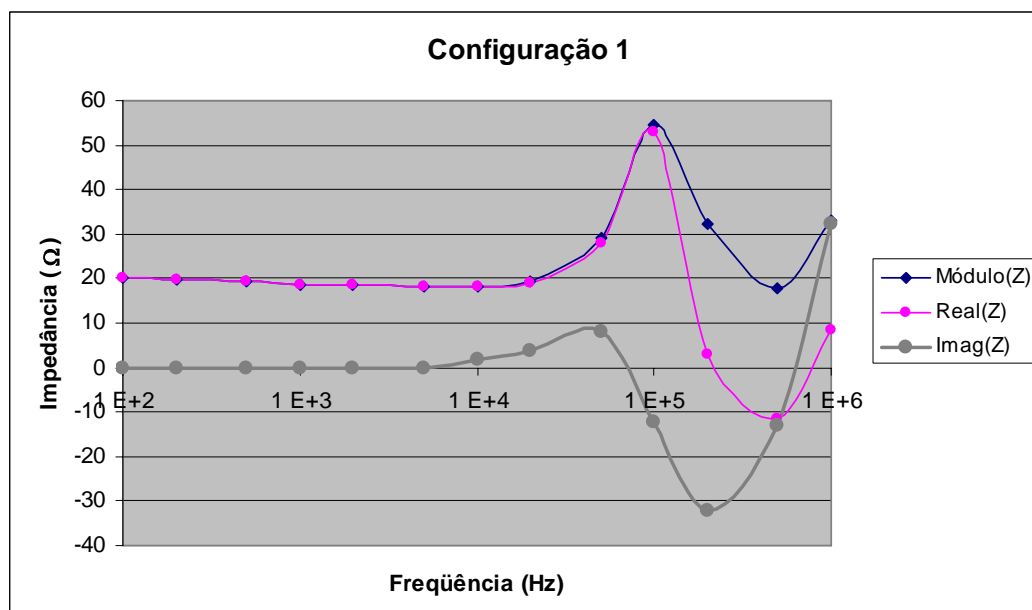


Figura 5.14 – Gráfico de impedância.

Configuração 2

Frequência (Hz)	V _{Resistor} (Vpp)	V _{Eletrodo} (Vpp)	Defasagem (μs)	ω (rad/s)	Impedância (Ω)	Defasagem (°)	Real(Z) (Ω)	Imag(Z) (Ω)
1 E+2	1.600	1.200	0	6.28E+02	7.5	0	7.50	0
2 E+2	1.600	1.140	0	1.26E+03	7.1	0	7.13	0
5 E+2	1.600	1.080	0	3.14E+03	6.8	0	6.75	0
1 E+3	1.600	1.050	8.000	6.28E+03	6.6	3	6.55	0.32973
2 E+3	1.600	1.100	6.000	1.26E+04	6.9	4	6.86	0.51787
5 E+3	1.580	1.040	8.000	3.14E+04	6.6	14	6.38	1.63695
1 E+4	1.580	1.090	7.600	6.28E+04	6.9	27.36	6.13	3.17
2 E+4	2.040	1.640	5.400	1.26E+05	8.0	38.88	6.26	5.05
5 E+4	1.720	2.920	2.500	3.14E+05	17.0	45.00	12.00	12.00
1 E+5	1.260	4.800	0.140	6.28E+05	38.1	5.04	37.95	3.35
2 E+5	0.928	2.360	-0.980	1.26E+06	25.4	-70.56	8.46	-23.98
5 E+5	0.712	1.100	-0.630	3.14E+06	15.4	-113.40	-6.14	-14.18
1 E+6	0.656	2.320	-0.744	6.28E+06	35.4	-267.84	-1.33	35.34

Tabela 5.3 – Valores obtidos para a Configuração 2.

Graficamente:

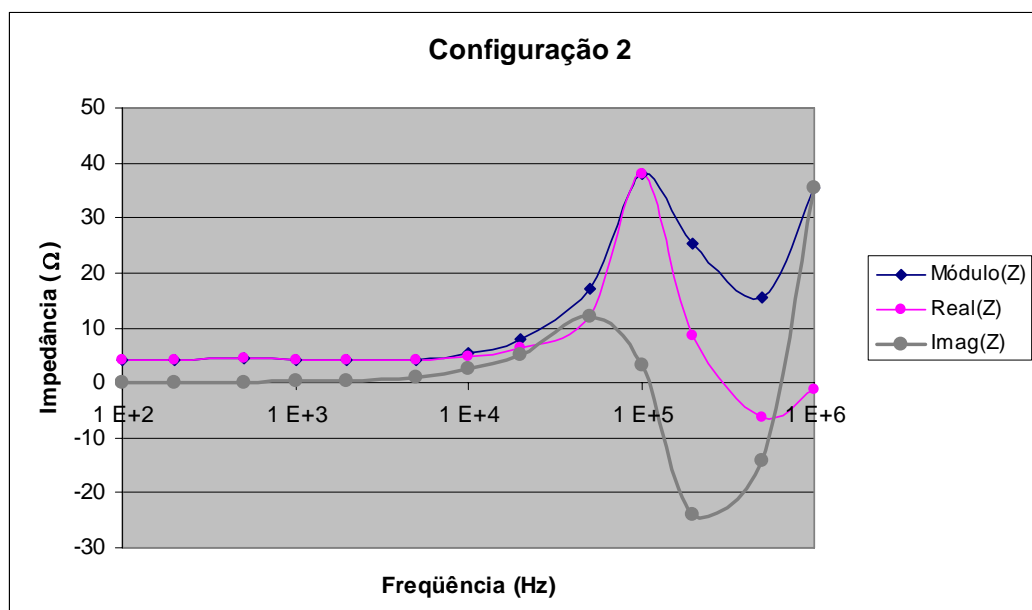


Figura 5.15 – Gráfico de impedância.

Configuração 3

Frequência (Hz)	V _{Resistor} (Vpp)	V _{Eletrodo} (Vpp)	Defasagem (μs)	ω (rad/s)	Impedância (Ω)	Defasagem (°)	Real(Z) (Ω)	Imag(Z) (Ω)
1 E+2	1.600	0.912	0.000	6.28E+02	5.7	0	5.70	0
2 E+2	1.620	0.896	0.000	1.26E+03	5.5	0	5.53	0
5 E+2	1.620	0.940	0.000	3.14E+03	5.8	0	5.80	0
1 E+3	1.600	0.848	0.000	6.28E+03	5.3	0	5.30	0
2 E+3	1.560	0.840	12.000	1.26E+04	5.4	9	5.32	0.81
5 E+3	1.580	0.912	11.000	3.14E+04	5.8	20	5.43	1.96
1 E+4	1.560	0.984	8.400	6.28E+04	6.3	30.24	5.45	3.18
2 E+4	1.560	1.320	6.200	1.26E+05	8.5	44.64	6.02	5.95
5 E+4	1.740	2.800	2.700	3.14E+05	16.1	48.60	10.64	12.07
1 E+5	1.280	4.640	0.280	6.28E+05	36.3	10.08	35.69	6.34
1.5 E+5	1.050	3.680	-0.880	9.42E+05	35.0	-47.52	23.67	-25.85
2 E+5	0.912	2.240	-0.940	1.26E+06	24.6	-67.68	9.33	-22.72
5 E+5	0.696	0.920	-0.630	3.14E+06	13.2	-113.40	-5.25	-12.13
6 E+5	0.760	1.320	-0.610	3.77E+06	17.4	-131.76	-11.57	-12.96
7 E+5	0.752	1.680	-0.620	4.40E+06	22.3	-156.24	-20.45	-9.00
1 E+6	0.640	1.120	-0.728	6.28E+06	17.5	-262.08	-2.41	17.33

Tabela 5.4 – Valores obtidos para a Configuração 3.

Graficamente:

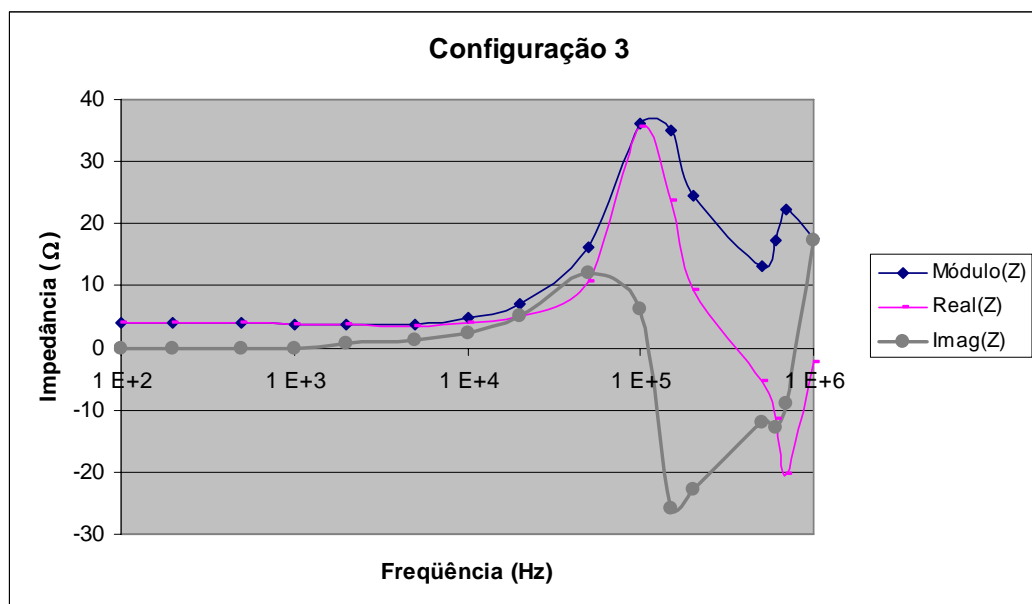


Figura 5.16 – Gráfico de impedância.

5.3.5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Para este ensaio foram utilizados os procedimentos descritos em [9], que são semelhantes ao ensaio para medição da impedância, só que utilizando em vez do gerador de sinais, um *Análise de Sistemas de Aterramento sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão.*

gerador portátil ajustado para operar numa frequência de 50 Hz, capaz de injetar uma corrente mais elevada no sistema de aterramento. Esta elevação possibilita aferir a medição da impedância, pois permite minimizar e discriminar os efeitos de possíveis fontes externas.

Devido ao fato de se injetar uma corrente mais elevada, há a necessidade de substituir o cabo coaxial por um condutor de maior capacidade. Isto não afeta as medições, pois como os circuitos de corrente e tensão são posicionados para que não haja acoplamento entre eles e como o ensaio é realizado em uma frequência baixa, o campo eletromagnético longitudinal induzido nestes circuitos pelo aterramento é desprezível. Dessa forma, foram empregados condutores isolados de 1,5 mm² de cobre em ambos os circuitos.

A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos para as três configurações. Foram utilizados dois tipos de medição com o osciloscópio, um no domínio do tempo (registrando diretamente os valores RMS dos sinais) e outro no domínio da frequência através da função FFT – “Fast Fourier Transform” (obtendo os valores em db).

Configuração 1

Medição	Tensão no Resistor		Resistor Shunt (Ω)	Corrente Injetada (A)	Elevação de Potencial		Resistência de Aterramento (Ω)
	(db)	(Vrms)			(db)	(Vrms)	
1	2,65	1,36	1,1	1,23	29,8	30,90	25,1
2	1,53	1,19		1,08	28,6	26,92	24,8
3*	-	1,50		1,36	-	33,94	24,9

Configuração 2

Medição	Tensão no Resistor		Resistor Shunt (Ω)	Corrente Injetada (A)	Elevação de Potencial		Resistência de Aterramento (Ω)
	(db)	(Vrms)			(db)	(Vrms)	
1	2,65	1,36	1,1	1,23	19,8	9,77	7,9
2*	-	1,50		1,36	-	10,32	7,6
3	9,05	2,83	2,3	1,23	19,4	9,33	7,6
4*	-	3,22		1,40	-	10,11	7,2

Configuração 3

Medição	Tensão no Resistor		Resistor Shunt (Ω)	Corrente Injetada (A)	Elevação de Potencial		Resistência de Aterramento (Ω)
	(db)	(Vrms)			(db)	(Vrms)	
1	5,85	1,96	2,5	0,78	13,8	4,90	6,2
2*	-	2,06		0,82	-	5,37	6,5

As medições indicadas com (*) foram efetuadas diretamente dos sinais senoidais aquisitados, sem a utilização da função FFT do osciloscópio.

Tabela 5.5 – Valores obtidos na medição de resistência de aterramento das três configurações.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações utilizando o programa computacional desenvolvido com base na metodologia apresentada no Capítulo 3. De forma a validar a modelagem adotada, serão confrontados os resultados obtidos através do programa com as medições de campo apresentadas no Capítulo 5 e, posteriormente, com resultados computacionais publicados anteriormente em [8] e [32].

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CAMPO

Neste item será analisada a consistência das simulações computacionais com os resultados obtidos em campo, apresentados no capítulo anterior, referentes às medições em baixas frequências, resistividade do solo e resistência de aterramento, e dos ensaios em função da frequência, parâmetros do solo e impedância.

6.1.1 RESISTIVIDADE DO SOLO × PARÂMETROS DO SOLO EM BAIXA FREQUÊNCIA

Inicialmente será avaliada a consistência entre a resistividade do solo obtida pelo método de Wenner, conforme Item 5.3.3, e os parâmetros do solo em baixa frequência medidos de acordo com o apresentado no Item 5.3.2. Como a amostra de solo é retirada próximo à superfície, a medição da condutividade do solo para a frequência de 100 Hz deve corresponder à resistividade superficial do solo.

A condutividade do solo, a 100 Hz, obtida pela medição dos parâmetros do solo, conforme Tabela 5.1, é de 2778 $\mu\text{S}/\text{m}$, que corresponde à resistividade de 360 $\Omega\cdot\text{m}$. De acordo com o apresentado no Item 5.3.2, a resistividade superficial do solo é de 370 $\Omega\cdot\text{m}$. Como se pode observar, os valores obtidos a partir das duas metodologias são praticamente idênticos, validando tanto a medição dos parâmetros do solo em baixas frequências como a modelagem da resistividade superficial do solo.

6.1.2 PARÂMETROS DO SOLO × RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO × IMPEDÂNCIA EM BAIXA FREQUENCIA

Para se avaliar a coerência entre a modelagem do solo em baixas frequências e as medições de resistência de aterramento e de impedância em baixas frequências, simulou-se computacionalmente as três configurações de sistema de aterramento considerando o solo homogêneo com os parâmetros definidos no Item 5.3.2. Os resultados da simulação são apresentados nos gráficos de impedância apresentados nas Figuras 6.2 a 6.4 do Item 6.1.3 a seguir.

Na tabela a seguir são confrontados os valores calculados computacionalmente com os obtidos através dos ensaios. Os valores de resistência referentes à simulação foram retirados das Figuras 6.2 a 6.4 do Item 6.1.3 e correspondem à frequência de 100 Hz. Por sua vez, os resultados relacionados ao ensaio de resistência de aterramento foram determinados a partir da Tabela 5.5, tomando-se o valor médio das medições efetuadas para cada configuração. Os valores do ensaio de impedância correspondem à medição em 100 Hz, retirados das Tabelas 5.2 a 5.4.

Configuração	Resistência de Aterramento (Ω)		
	Simulação	Ensaio de Resistência	Ensaio de Impedância
1	22,4	25,0	24,2
2	7,7	7,6	7,5
3	6,0	6,4	5,7

Tabela 6.1 – Comparativo entre os valores de resistência de aterramento obtidos.

Pode-se observar que os valores são bem consistentes, permitindo validar tanto a modelagem do solo em baixas frequências como os ensaios de resistência de aterramento e de impedância em baixas frequências.

6.1.3 PARÂMETROS DO SOLO × ENSAIO DE IMPEDÂNCIA

Conforme já abordado no Item 5.2, as grandezas medidas no ensaio de impedância não corresponde à impedância do sistema de aterramento, mas sim à razão entre a tensão do ponto central do sistema de aterramento com relação a um ponto no solo situado à distancia de 100 m (indicado na Figura 5.13) e a corrente injetada através do circuito de corrente (também indicado nesta figura). Portanto, para se avaliar a coesão entre os parâmetros do solo e a impedância medida em função da frequência, devem ser simuladas computacionalmente as três configurações, considerando a modelagem dos parâmetros do solo apresentada no Item 5.3.2. Os resultados obtidos a partir destas simulações serão comparados com os obtidos no Item 5.3.4.

Cumprе ressaltar que na época dos ensaios não se atentou para o registro do caminhamento real dos cabos de medição, mas sim para um indicativo da direção dos mesmos. Como se pode observar pelos resultados apresentados no Item 5.3.4, nas frequências mais altas torna-se pronunciado o efeito dos acoplamentos entre circuitos de medição e os cabos contrapeso.

A comparação com os resultados computacionais sem considerar estes efeitos presentes na medição só pode ser feita para frequências até cerca de 50 kHz. Com base neste fato e havendo a necessidade de validação da modelagem empregada no programa computacional, em todo o espectro de interesse, julgou-se mais adequado aferir o programa desenvolvido através de resultados apresentados em trabalhos anteriormente publicados [8,32], utilizando-se os mesmos parâmetros adotados nestas referências (configuração de sistema de aterramento, modelo do solo e demais características). Esta análise é desenvolvida no Item 6.2.

No entanto, de forma a se avaliar qualitativamente os resultados obtidos nos ensaios de campo, simulou-se a configuração 1 considerando não só o sistema de aterramento mas ambos os circuitos de medição, dentro das aproximações possíveis quanto ao caminhamento dos cabos e modelagem dos mesmos. O resultado é apresentado na figura a seguir.

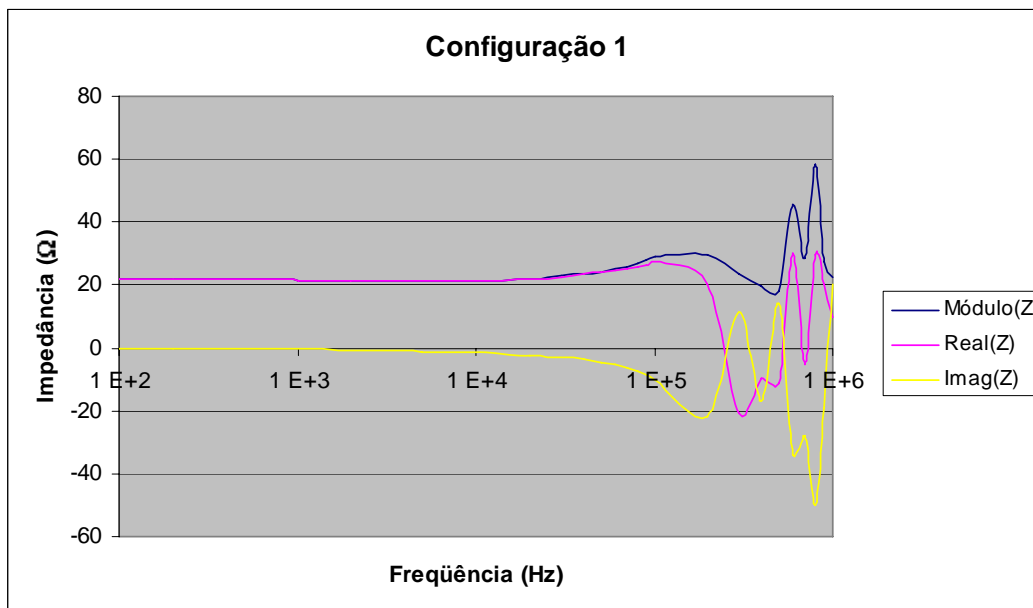


Figura 6.1 – Simulação da configuração 1 correspondente ao ensaio de campo.

Comparando-se com a Figura 5.14, pode se observar o valor negativo na parte real e alguma correlação dos valores obtidos na simulação com os resultados do ensaio para as frequências medidas. As oscilações encontradas na simulação, apresentadas na Figura 6.1, não foram observadas nos resultados do ensaio possivelmente devido à pequena quantidade de pontos medidos.

A título de complementação das informações, nos gráficos a seguir são apresentados os resultados computacionais da impedância de aterramento no ponto de injeção de corrente (ponto central) relativos a cada uma das configurações analisadas, para o espectro de frequência considerado.

Configuração 1

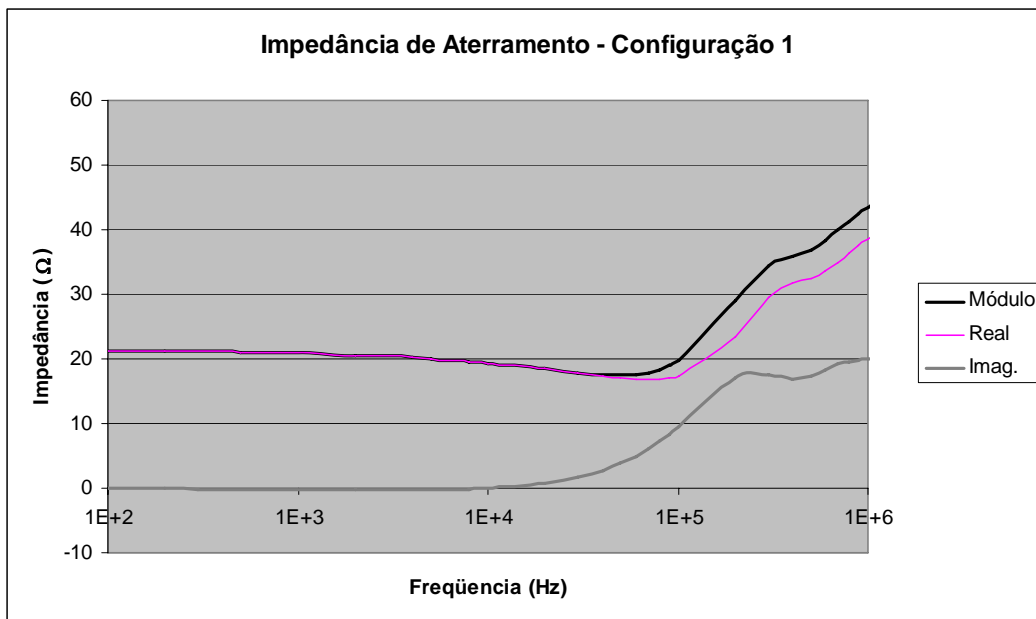


Figura 6.2 – Impedância de aterramento obtida computacionalmente para a configuração 1.

Configuração 2

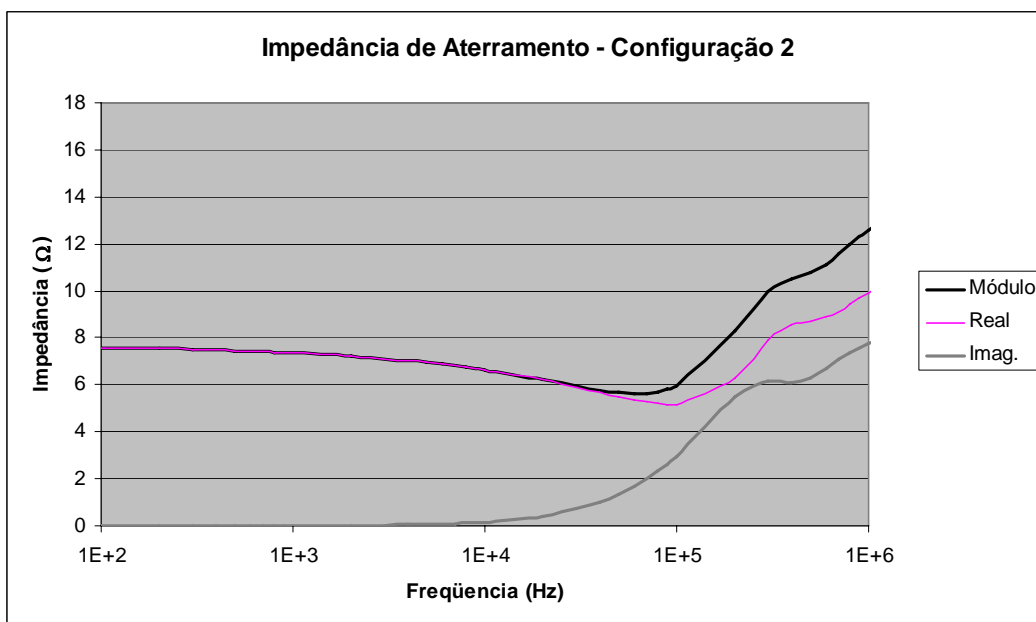


Figura 6.3 – Impedância de aterramento obtida computacionalmente para a configuração 2.

Configuração 3

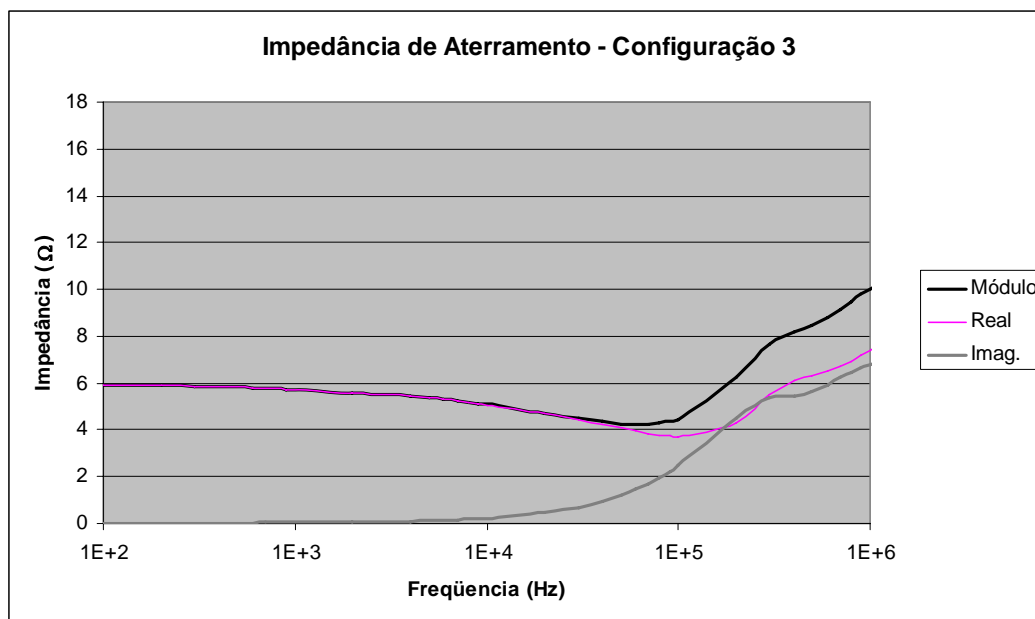


Figura 6.4 – Impedância de aterramento obtida computacionalmente para a configuração 3.

6.2 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS PUBLICADOS ANTERIORMENTE

Neste item serão confrontados os resultados obtidos através do programa computacional desenvolvido com os publicados em trabalhos anteriores [8,32]. Para isto, serão simuladas as configurações de sistemas de aterramento considerando os respectivos parâmetros utilizados no trabalho em questão, quer seja configuração geométrica, tipo e bitola de condutores e/ou hastes, parâmetros do solo em função da frequência, características e forma de onda da corrente injetada. A avaliação se refere aos principais resultados apresentados no trabalho e estão relacionadas a impedâncias dos sistemas de aterramento, tensões transversais ou longitudinais no solo e tensões de toque e passo no domínio do tempo e/ou da frequência.

6.2.1 SISTEMA RADIAL

Inicialmente serão avaliados os resultados apresentados em [32], a configuração utilizada corresponde a um aterramento tipicamente empregado em sistemas de distribuição,

composto por dois condutores com 12 m de comprimento posicionados perpendicularmente entre si, sendo que em cada extremidade deste condutor e também no ponto central existe uma haste com 3 m de comprimento, conforme apresentado na figura a seguir:

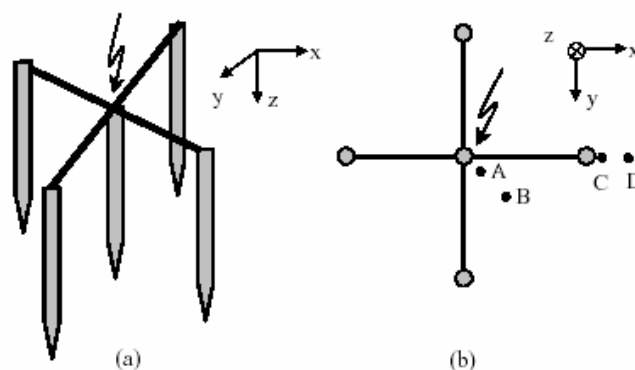


Figura 6.5 – Sistema de aterramento utilizado em [32]: (a) em perspectiva e (b) vista superior.

A modelagem utilizada para o solo corresponde à apresentada na Equação 2-1, sendo adotados os seguintes parâmetros para esta função:

$$\sigma_0 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ S/m};$$

$$\Delta_i = 11,71 \times 10^{-3} \text{ S/m};$$

$$\alpha = 0,706.$$

Os resultados apresentados na referência [32], de interesse a serem confrontados, dizem respeito à tensão de toque e passo, para as frequências de 1 pHz e 1 MHz e no domínio do tempo, e à tensão¹ no ponto central do aterramento no domínio do tempo, considerando uma injeção de corrente com forma de onda indicada na Figura 4.10 de valor máximo 1 A.

Tensão de Passo

Na Figura 6.6 a seguir é apresentado o comportamento da tensão de passo ao longo de um perfil que se encontra posicionado sobre uma reta paralela a um dos condutores, a 4 m do mesmo, iniciando em $x = 0$ até $x = 10$ m.

¹ Tensão com relação a um ponto infinitamente afastado do sistema de aterramento.

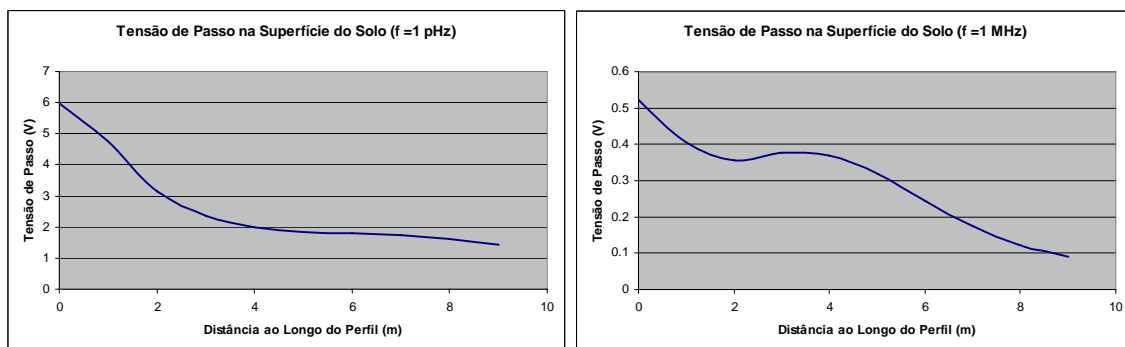


Figura 6.6 – Tensão de passo obtida ao longo de um perfil no solo.

Os resultados apresentados em [32], indicados na Figura 6.7, não permitem uma comparação direta com os gráficos anteriores. Contudo, pode-se notar que os valores obtidos estão condizentes.

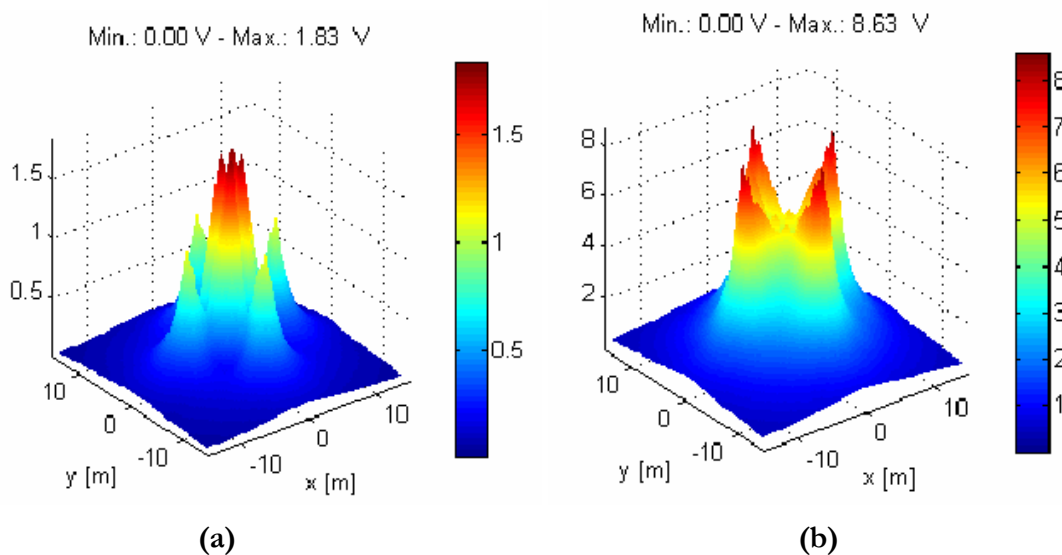


Figura 6.7 – Tensão de passo na superfície do solo: (a) frequência de 1 pHz e (b) frequência de 1 MHz.

Em [32] é também calculada a tensão de passo no domínio do tempo entre os pontos A e B, de coordenadas $(x=0.5, y=0.5)$ e $(x=1.2, y=1.2)$ e entre C e B, de coordenadas $(x=6.0, y=0.0)$ e $(x=7.0, y=0.0)$.

Nos gráficos da figura a seguir são apresentados os resultados obtidos através do programa computacional desenvolvido.

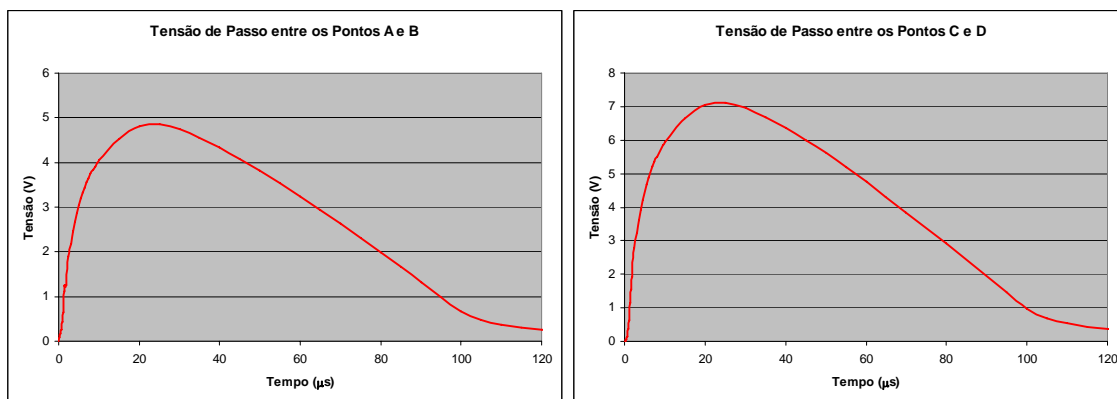


Figura 6.8 – Tensão de passo no solo entre os pontos A-B e C-D, obtidos através do programa computacional.

Comparando-se com os resultados apresentados em [32], indicados na Figura 6.9, é possível observar a coerência com os valores obtidos. Cumpre observar que neste trabalho foram considerados dois modelos de solo, um com parâmetros elétricos constantes (I) e outro dependente da frequência (II). O de interesse é o modelo (II).

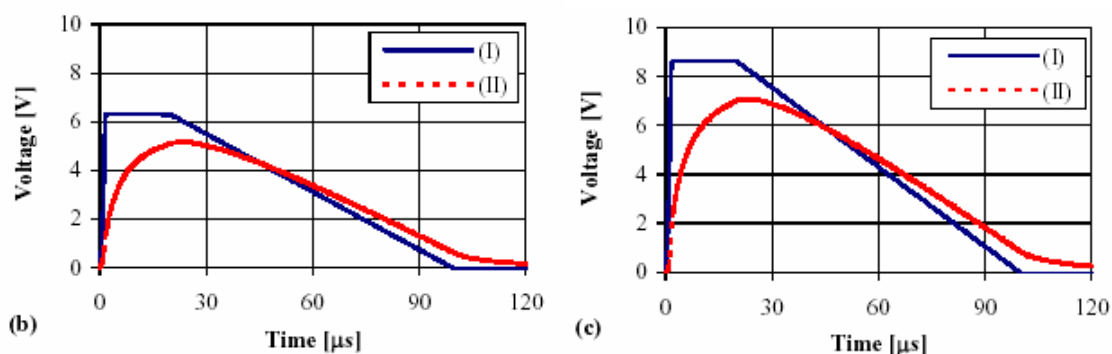


Figura 6.9 – Tensão de passo no solo entre os pontos A-B e C-D apresentado em [32].

Tensão de Toque

A tensão de toque está relacionada à tensão entre a superfície do solo, em pontos sobre o mesmo perfil considerado anteriormente, e os correspondentes pontos do sistema de aterramento mais próximos.

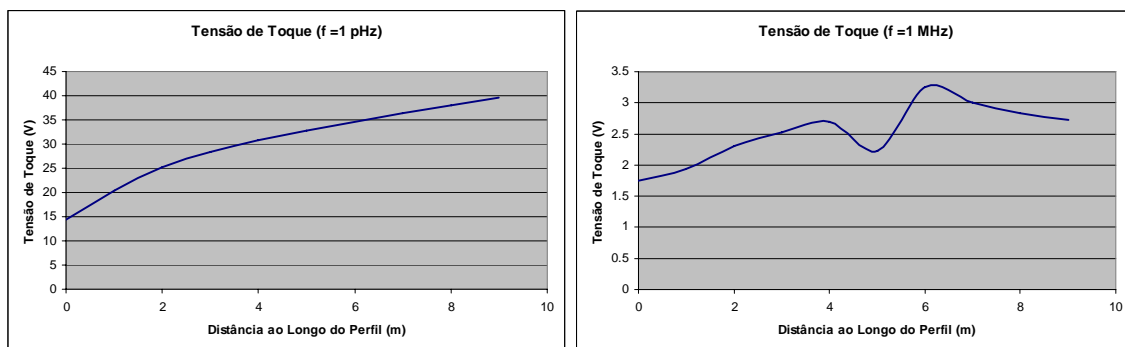


Figura 6.10 - Tensão de toque obtida entre o perfil no solo e pontos mais próximos no aterramento.

Apesar de os resultados apresentados em [32], indicados na figura a seguir, não permitirem uma visualização direta com os da Figura 6.10, pode-se notar a coerência entre os mesmos.

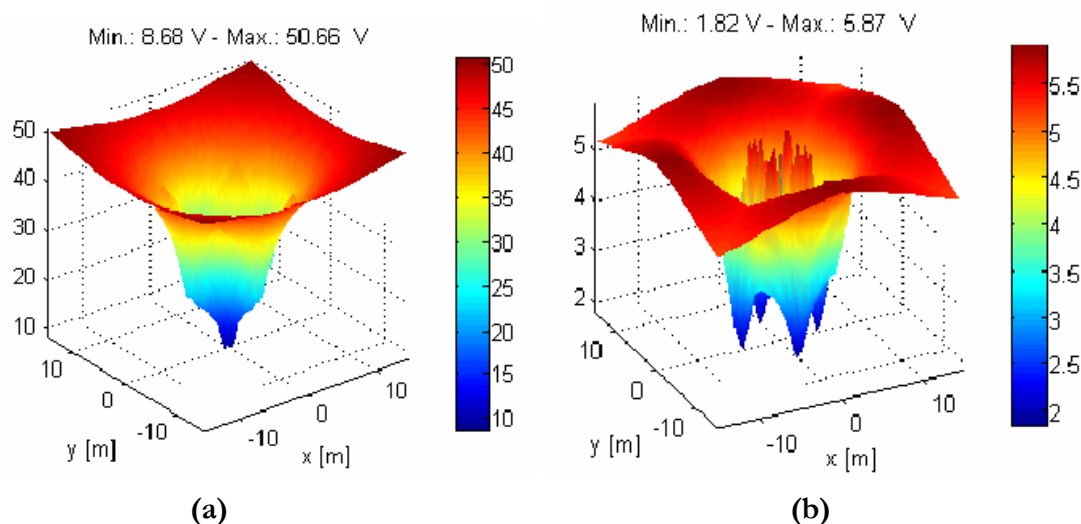


Figura 6.11 – Tensão de toque na superfície do solo: (a) frequência de 1 pHz e (b) frequência de 1 MHz.

Tensão do Aterramento

Neste item é comparada a tensão¹ do sistema de aterramento, no ponto central, para uma injeção de corrente também neste ponto. Na figura a seguir encontra-se o gráfico de [32], que corresponde à tensão do aterramento considerando dois modelos de solo, um com parâmetros elétricos constantes (I) e outro dependente da frequência (II).

¹ Tensão com relação a um ponto infinitamente afastado do sistema de aterramento.

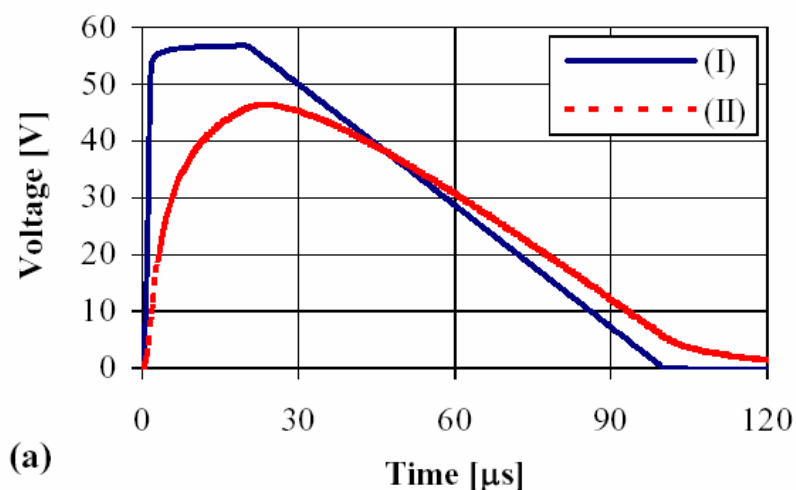


Figura 6.12 – Tensão de toque na superfície do solo: (a) frequência de 1 pHz e (b) frequência de 1 MHz.

Realizando a simulação correspondente ao modelo de solo com parâmetros elétricos dependentes da frequência, obtém-se o seguinte comportamento:

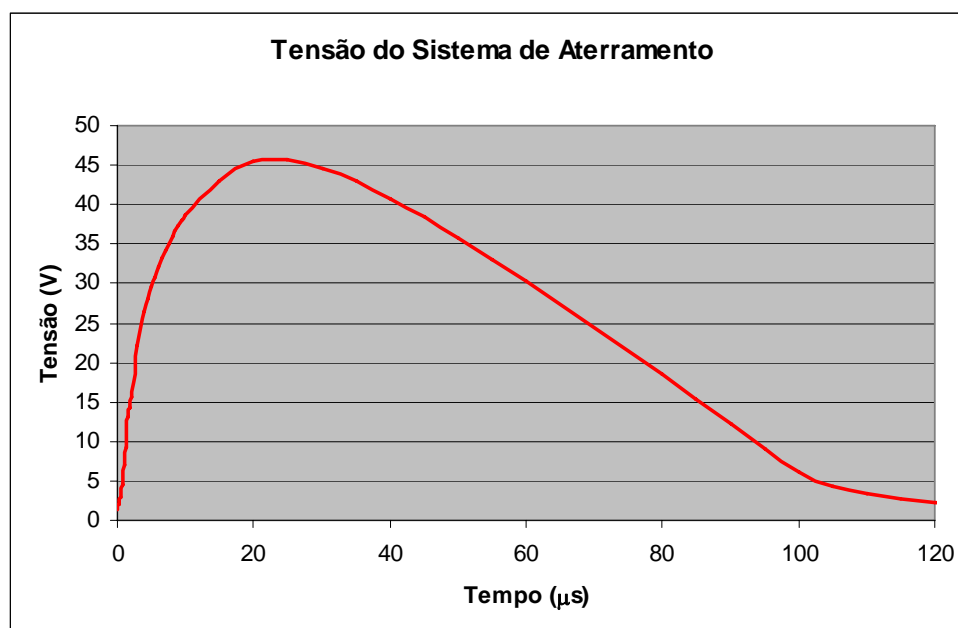


Figura 6.13 – Tensão do aterramento no ponto central, considerando a corrente apresentada na Figura 4.10 sendo injetada no ponto central.

A análise de ambos os resultados revela a coerência entre os mesmos, no que se refere ao valor máximo, forma de onda e os referidos tempos.

6.2.2 MALHA DE TERRA

Serão analisados os resultados apresentados em [8], onde foi utilizado o sistema de aterramento indicado na figura a seguir, com dimensões de 156 m x 156 m, a uma profundidade de 0,5 m.

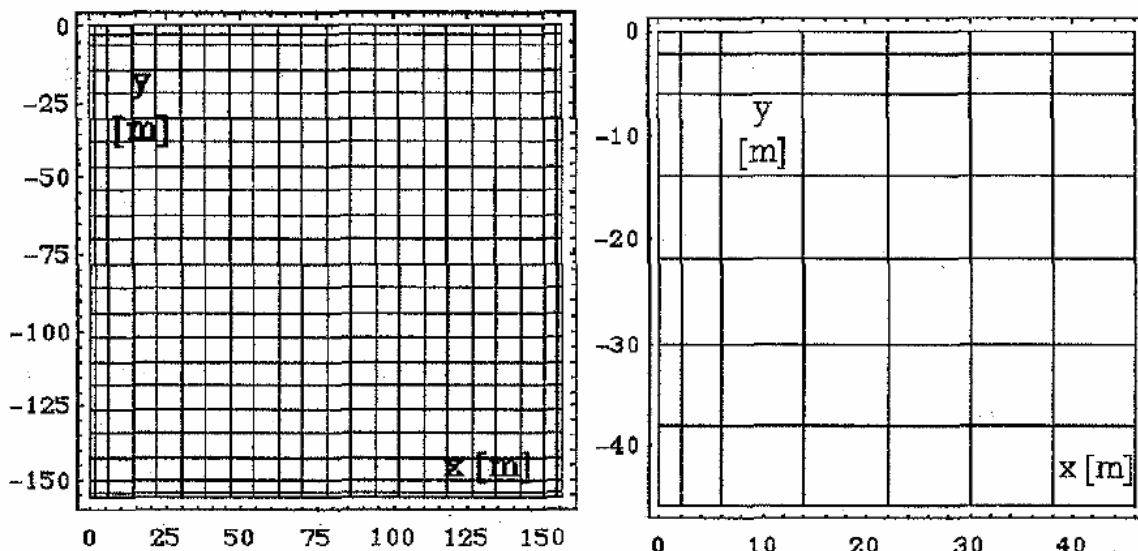


Figura 6.14 – Sistema de aterramento utilizado em [8].

O solo é representado pelo modelo indicado na Equação 2-1, tendo os seguintes parâmetros:

$$\sigma_0 = 0,5 \times 10^{-3} \text{ S/m};$$

$$\Delta_i = 0,90 \times 10^{-3} \text{ S/m};$$

$$\alpha = 0,55.$$

Os pontos M1 e M2 onde foram calculadas a tensão e a impedância transversal do sistema de aterramento e os pontos de interesse S1, S5 e S6 onde foram determinadas as tensões transversais na superfície do solo encontram-se apresentados na figura a seguir:

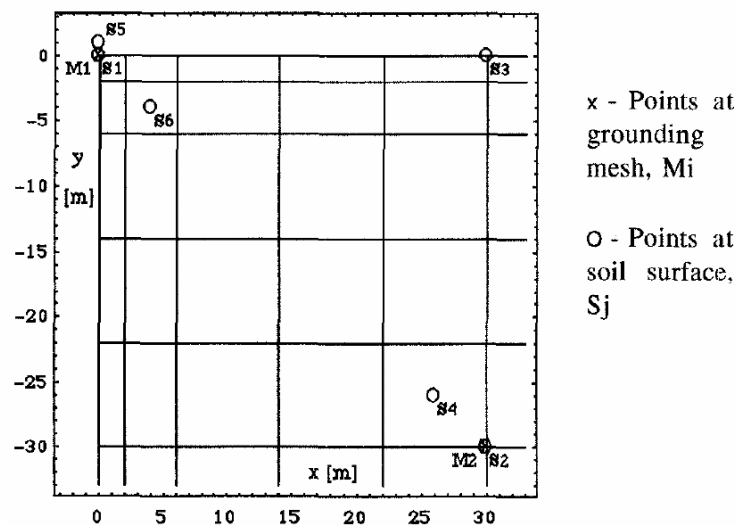


Figura 6.15 – Localização dos pontos pesquisados.

Os resultados apresentados em [8] são indicados nas figuras a seguir.

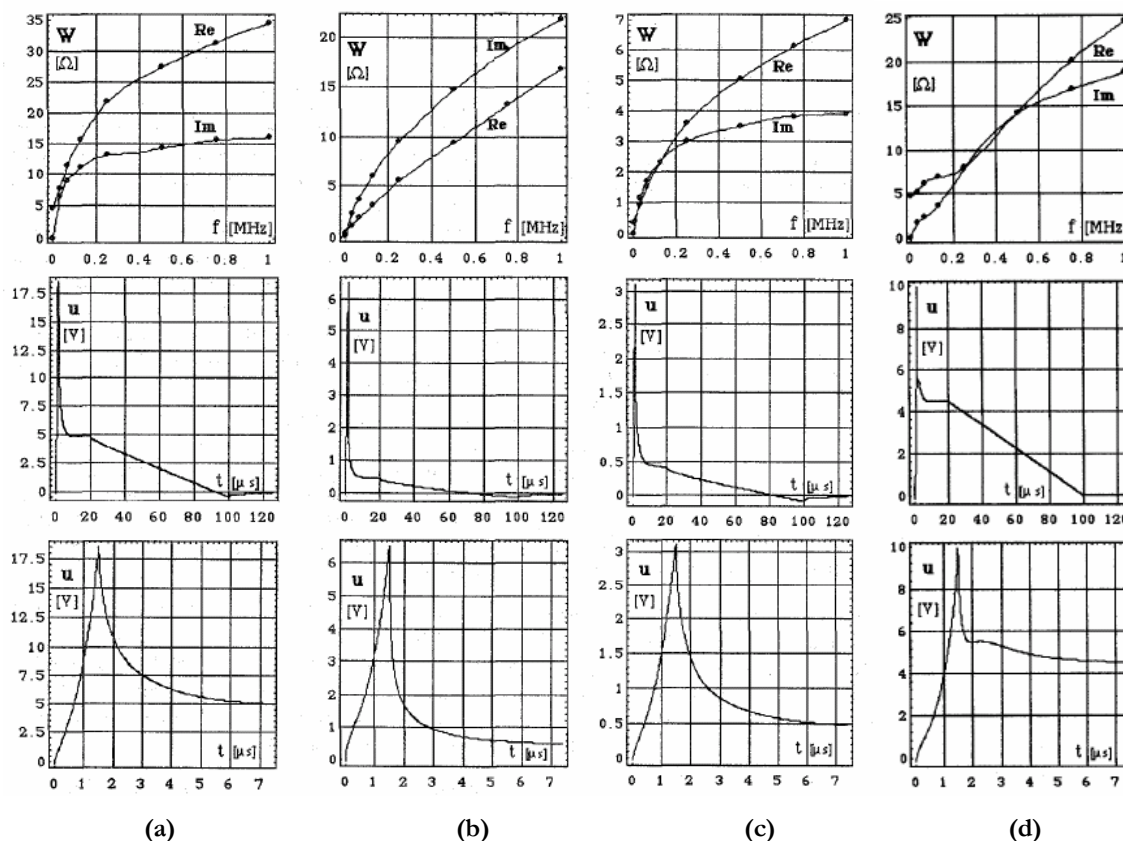


Figura 6.16 – Resultados apresentados em [8] para a malha de terra indicada anteriormente, para uma corrente injetada segundo Figura 4.10. Considerando injeção no ponto M1, tem-se: (a) tensão transversal no ponto M1, (b) diferença entre tensões transversais dos pontos M1 e S6 e (c) diferença entre tensões transversais dos pontos S1 e S5. Para injeção no ponto M2, tem-se (d) tensão transversal no ponto M2.

A corrente injetada apresenta a forma de onda indicada em Figura 4.10 com valor máximo 1 A. No que se refere às figuras (b) e (c) anteriormente apresentadas, a função W corresponde à imitância, que relaciona a grandeza analisada com a corrente injetada.

Simulando-se esta configuração de sistema de aterramento, considerando a mesma modelagem do solo e forma de onda, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados nas figuras a seguir.

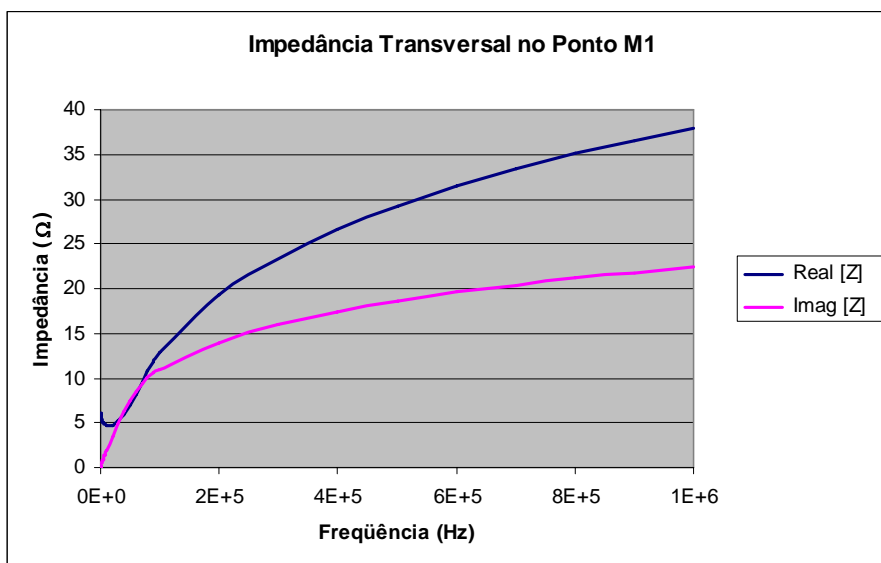


Figura 6.17 – Impedância no ponto M1.

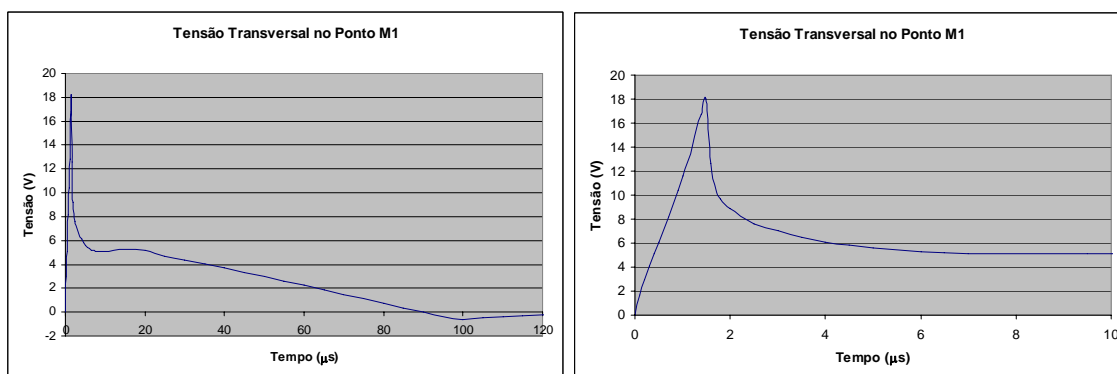


Figura 6.18 – Tensão transversal no ponto M1, considerando injeção neste ponto.

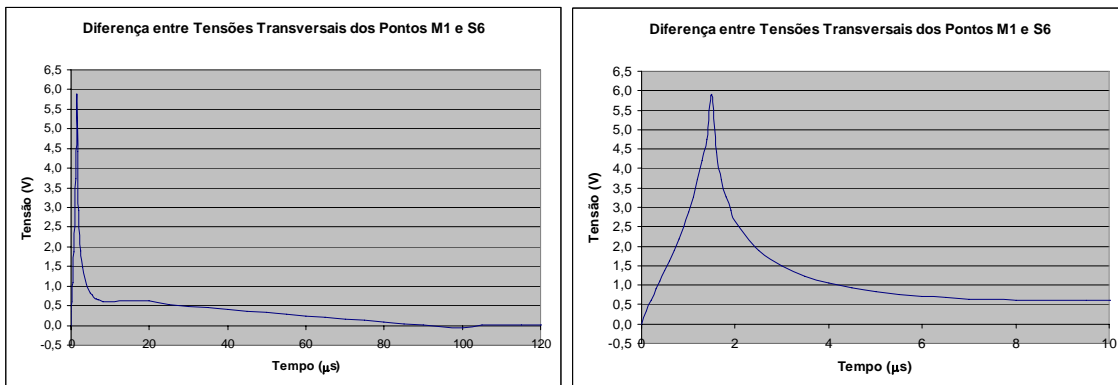


Figura 6.19 – Diferença entre as tensões transversais nos pontos M1 e S6, no domínio do tempo, considerando injeção em M1.

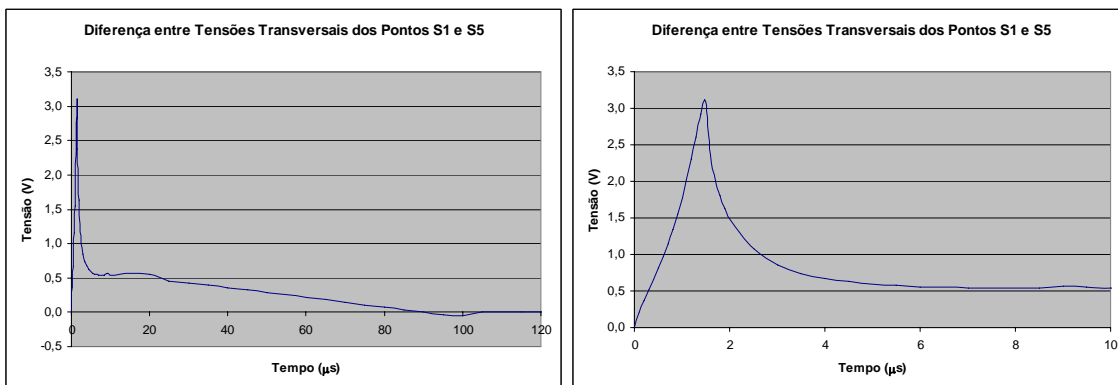


Figura 6.20 – Diferença entre tensões transversais entre os pontos S1 e S5, no domínio do tempo, considerando injeção em M1.

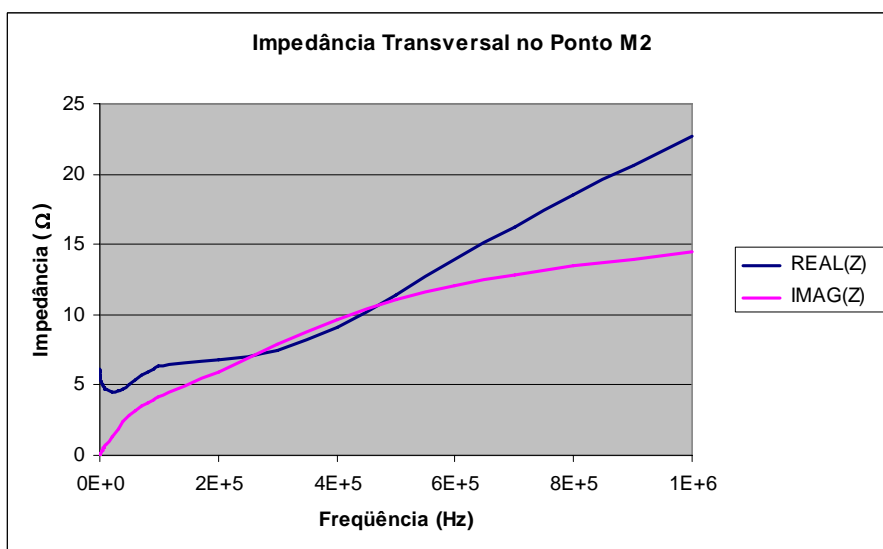


Figura 6.21 – Impedância no ponto M2.

Analisando os gráficos obtidos com o programa computacional e os resultados indicados na Figura 6.16, pode-se observar a coerência entre os mesmos, no que respeita às impedâncias e as tensões tanto no sistema de aterramento quanto na superfície do solo.

A comparação com resultados apresentados em artigos publicados [8,32], apresentada ao longo de todo este Item 6.2, permitiu a validação do programa computacional desenvolvido neste trabalho, no que se refere às diversas grandezas envolvidas (tensões, correntes e impedâncias) tanto no domínio da frequência quanto do tempo. A partir desta constatação, serão desenvolvidas no item a seguir diversas simulações de sistemas de aterramento de estruturas que permitirão estabelecer as análises e as conclusões necessárias ao trabalho.

6.3 ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste item serão analisados os sistemas de aterramento de estruturas de linhas de transmissão considerando três tipos de configurações e solos de diferentes resistividades. Os seus parâmetros elétricos em função da frequência são representados através da Equação 2-1, tendo os seguintes parâmetros:

$$\sigma_0 = 10 \times 10^{-3} / 2 \times 10^{-3} / 1,0 \times 10^{-3} / 0,5 \times 10^{-3} \text{ e } 0,2 \times 10^{-3} \text{ S/m;}$$

$$\Delta_i = 0,90 \times 10^{-3} \text{ S/m;}$$

$$\alpha = 0,55.$$

Estes valores de σ_0 correspondem, respectivamente, às resistividades em baixas frequências de 100 Ω .m, 500 Ω .m, 1000 Ω .m, 2000 e 5000 Ω .m.

A prática usual (e incorreta) para determinação dos aterramentos de estruturas de LT's é feita exclusivamente com base no comportamento à frequência industrial, tendo como critério o atendimento a um determinado valor de resistência de aterramento a 60 Hz. Para as configurações tipicamente utilizadas, este parâmetro é basicamente função da resistividade do solo e do comprimento de cabo contrapeso. As configurações 1 e 2 foram adotadas de forma a representar o que comumente é utilizado em solos de baixas e altas

resistividades, respectivamente. Por sua vez, a configuração 3, embora não seja utilizada, representa uma alternativa para solos de resistividades elevadas.

Considerou-se a corrente injetada no sistema de aterramento de acordo com a forma de onda indicada em Figura 4.10, considerando um valor máximo 1 A. Nas simulações foi admitido que ponto de injeção corresponde a um ponto central acima da superfície do solo, que está interligado aos cabos contrapeso através de elementos condutores não enterrados. Fisicamente esta interligação corresponde às pernas da estrutura. Contudo, não foram modelados pelo programa computacional os acoplamentos entre esses elementos e os condutores do aterramento.

Para cada configuração analisada serão apresentados os resultados da simulação: impedância e tensão do sistema de aterramento no ponto de injeção de corrente, valores máximos das tensões de toque e passo nos pontos pesquisados e probabilidade de superar os critérios de risco associados à segurança de pessoas.

6.3.1 CONFIGURAÇÃO 1

Esta configuração, representada na figura a seguir, é tipicamente utilizada quando o solo apresenta baixa resistividade em baixas frequências. Por isso foram realizadas simulações para σ_0 de 10 mS/m, 2 mS/m e 1 mS/m (correspondente às resistividades de 100 Ω .m, 500 Ω .m e 1000 Ω .m, respectivamente).

Os condutores do sistema de aterramento foram considerados como sendo cabos de cobre com diâmetro de 10 mm. Por sua vez, para representar as fundações da estrutura foram incluídos em cada base da estrutura tubos de aço de diâmetro 20 cm com 5 m de profundidade.

Foram pesquisadas as tensões de toque e passo segundo os perfis representados na figura seguir. Cumpre observar que embora tenha sido pesquisado ao longo dos perfis indicados, a direção relacionada à abertura dos pés do indivíduo influencia as tensões de passo, havendo por isso de ser determinado para cada ponto pesquisado as tensões num raio de 360°. Contudo, devido à quantidade de dados a serem gerados através deste procedimento,

procurou-se pesquisar somente sob perfis. Para avaliar este efeito nas simulações, adotaram-se perfis perpendiculares entre si.

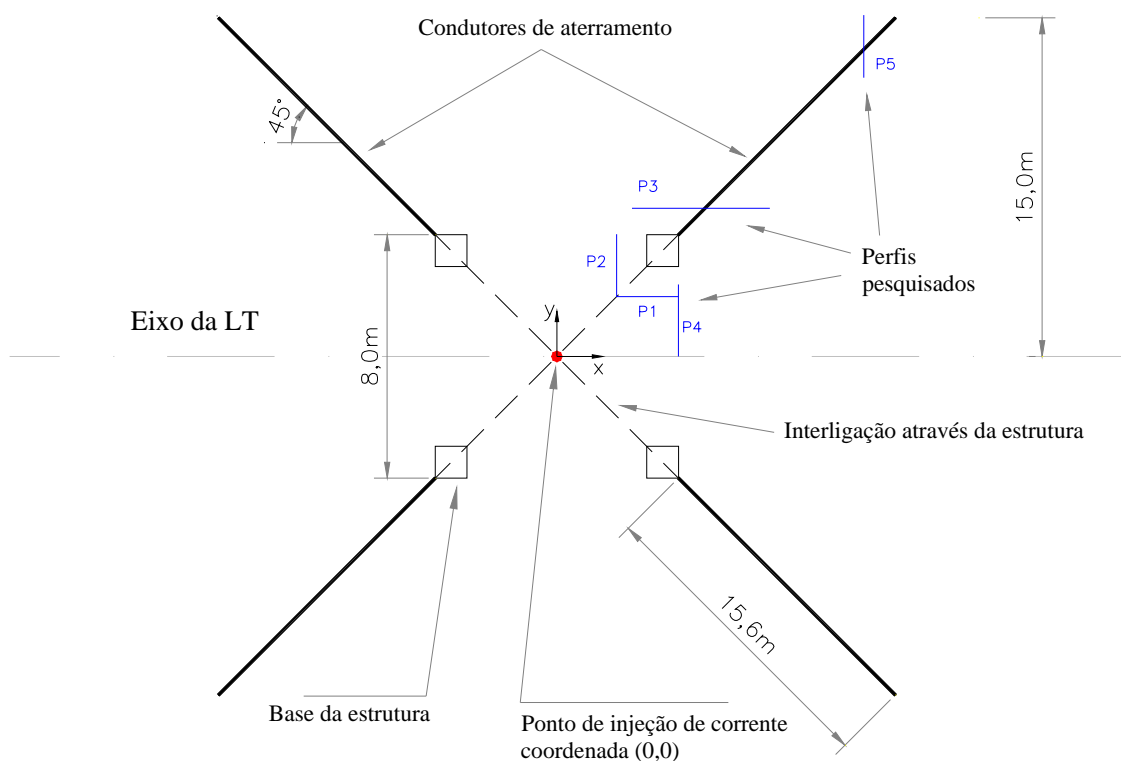


Figura 6.22 – Sistema de aterramento - Configuração 1.

Considerando os eixos x e y indicados na figura anterior, com origem no ponto central do aterramento, têm-se as seguintes coordenadas para os perfis.

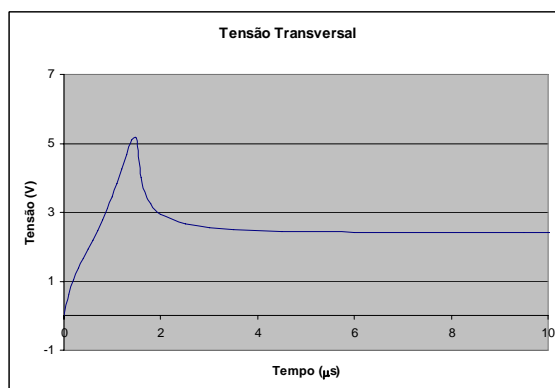
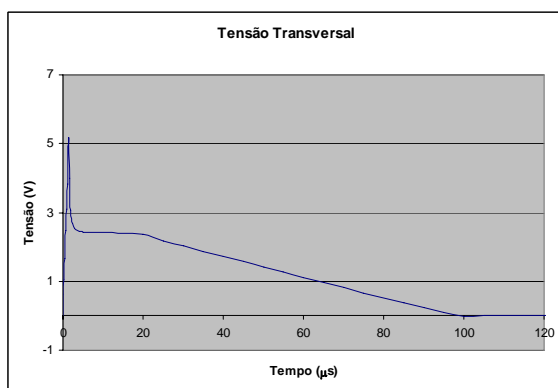
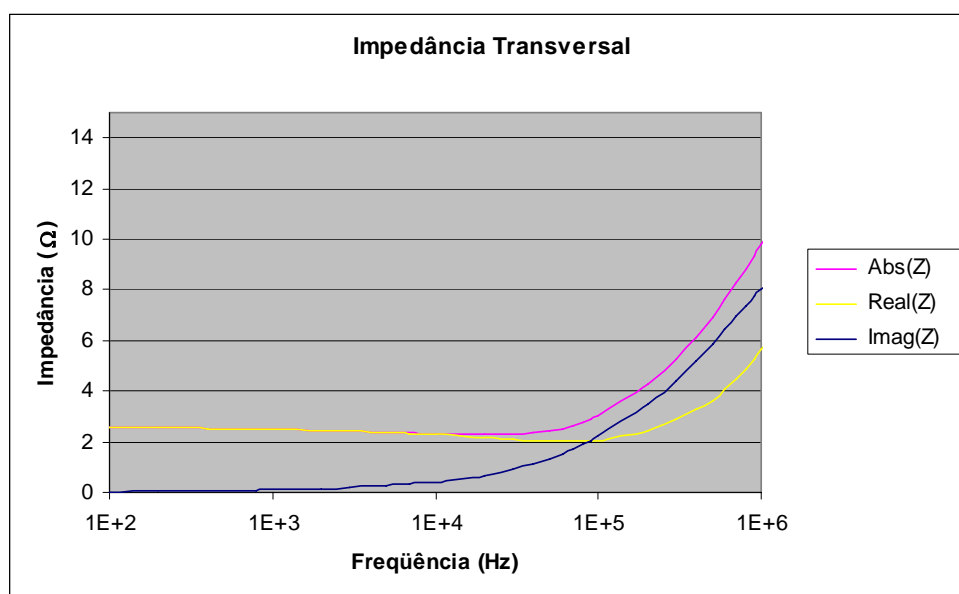
Perfil	Coordenada Inicial		Coordenada Inicial	
	x	y	x	y
1	2,5	2,5	4,0	2,5
2	2,5	2,5	2,5	4,0
3	3,5	5,0	7,5	5,0
4	0,0	4,0	3,0	4,0
5	14,0	13,0	14,0	15,0

Os perfis selecionados para o cálculo das tensões de toque são os perfis 1, 2 e 3. Eles foram definidos considerando uma pessoa à distância de 1 m da estrutura. Contudo, como normalmente as pernas de uma estrutura são inclinadas, uma pessoa pode se encontrar a

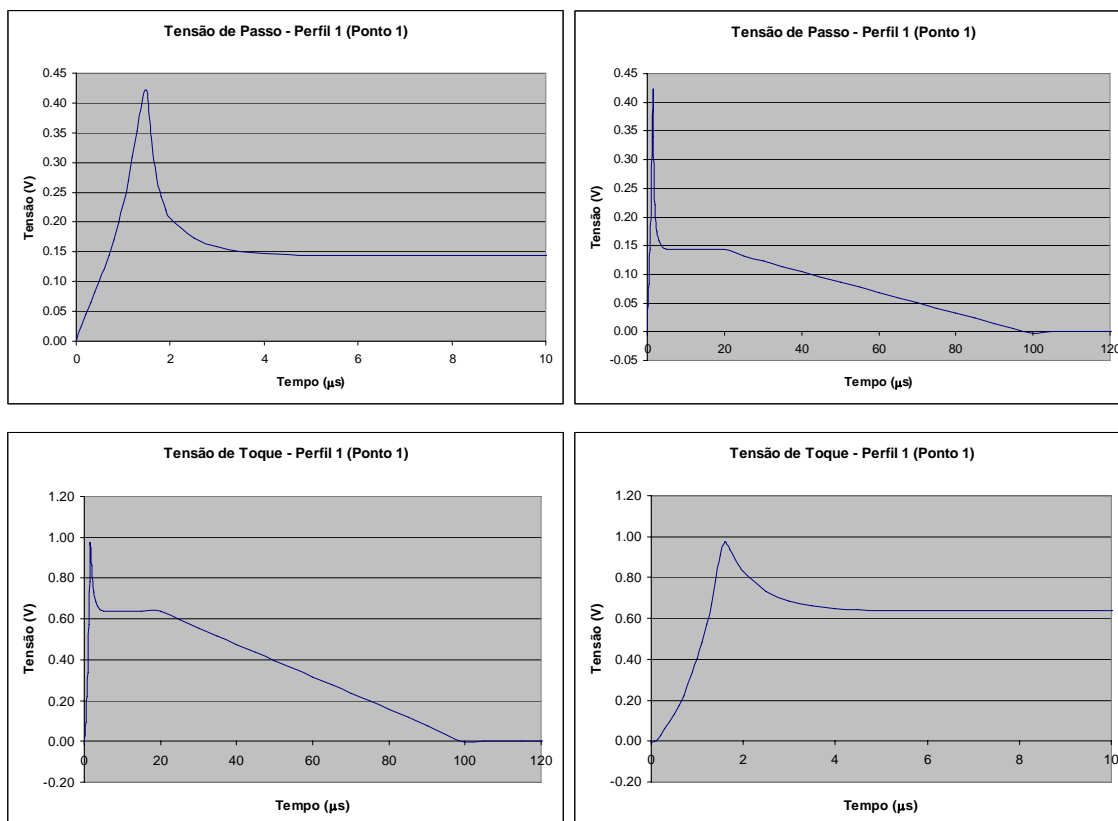
mais de um metro da base da estrutura e mesmo assim ainda estar tocando a estrutura. Para representar esta possibilidade, foi considerado que cada face apresenta uma inclinação de 30° com a vertical.

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 10 \text{ mS/m}$

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados das simulações: impedância do sistema de aterramento em função da frequência e tensão no domínio do tempo.



As tensões de toque e passo foram determinadas segundo os perfis indicados na Figura 6.22. Para o ponto de coordenadas (2,5m , 2,5m) têm-se as seguintes tensões apresentadas nas figuras a seguir.



Devido à grande quantidade de dados, os resultados das tensões calculadas para os demais pontos serão apresentados na tabela a seguir, sendo indicados os valores máximos encontrados.

Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	1.019
	2	3.0	2.5	0.996
	3	3.5	2.5	0.958
	4	4.0	2.5	0.902
2	1	2.5	2.5	1.019
	2	3.0	2.5	0.996
	3	3.5	2.5	0.958
	4	4.0	2.5	0.902
3	1	3.0	5.0	0.975
	2	3.5	5.0	0.913
	3	4.0	5.0	0.860
	4	4.5	5.0	0.861
	5	5.0	5.0	0.981
	6	5.5	5.0	1.138
	7	6.0	5.0	1.277
	8	6.5	5.0	1.394
9	7.0	5.0	1.494	

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.063
	2 4	0.097
2	1 3	0.063
	2 4	0.097
3	1 3	0.135
	2 4	0.096
	3 5	0.134
	4 6	0.277
	5 7	0.296
	6 8	0.256
	7 9	0.217
4	1 3	0.061
	2 4	0.094
	3 5	0.131
	4 6	0.171
	5 7	0.204
5	1 3	0.170
	2 4	0.065
	3 5	0.312

Cumpra observar que os valores indicados nas tabelas anteriores foram obtidos considerando na simulação a corrente injetada com a forma de onda de Berger, indicada na Figura 4.10, sendo adotado o valor de crista de 1 A .

Pode-se observar que as tensões nos pontos pesquisados nos perfis 1 e 2 são semelhantes. Este era um comportamento esperado, uma vez que tais perfis estão posicionados em simetria com relação aos condutores do aterramento. Nos próximos resultados, somente será apresentado o perfil 1.

O perfil 4 não foi indicado na tabela referente à tensão de toque devido às características estruturais das torres, conforme analisado anteriormente. Por sua vez, o perfil 5 está muito distante da torre para ser tocado.

Aplicando os critérios de risco apresentados no Item 3.2.3, será determinada a probabilidade do parâmetro D , indicado na Equação 3-20, superar $\int |i(t)|^{1,4} dt$, sendo sua função de probabilidade acumulada apresentada na Figura 3.6. Dessa forma, têm-se as seguintes probabilidades de risco associadas aos primeiros impulsos de descarga negativa:

Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	0.996
	2	0.996
	3	0.995
	4	0.994
2	1	0.996
	2	0.996
	3	0.995
	4	0.994
3	1	0.993
	2	0.990
	3	0.986
	4	0.983
	5	0.989
	6	0.995
	7	0.997
	8	0.998
9	0.999	

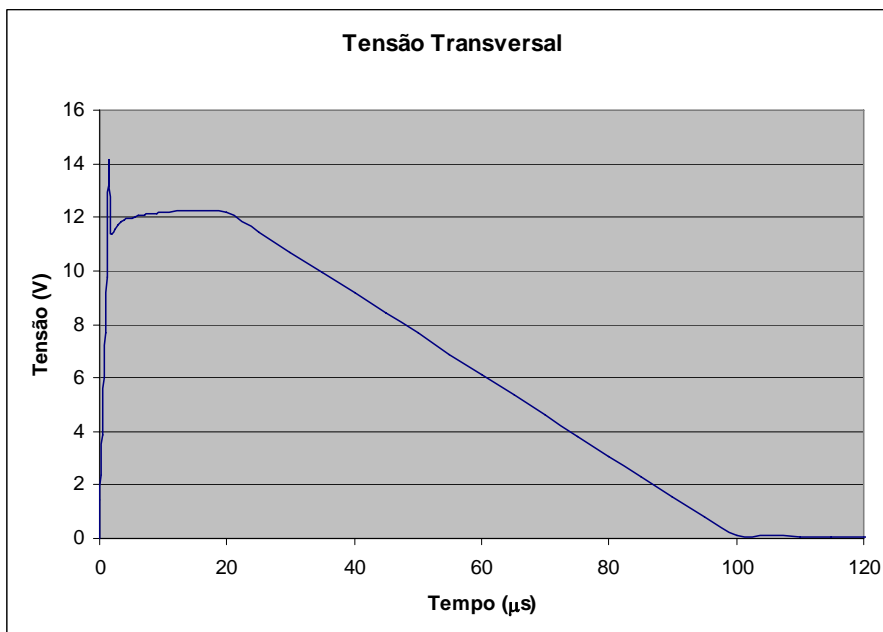
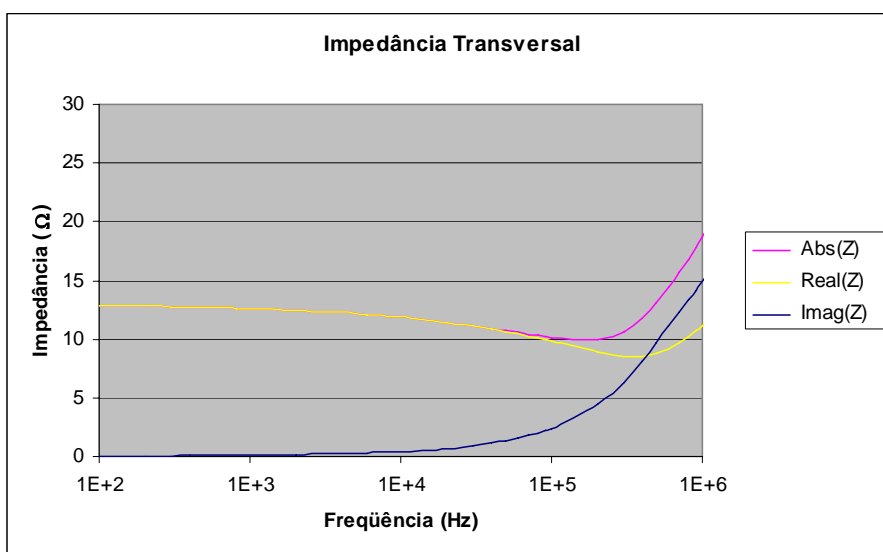
Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.028
	2 4	0.098
2	1 3	0.028
	2 4	0.098
3	1 3	0.335
	2 4	0.200
	3 5	0.027
	4 6	0.524
	5 7	0.608
	6 8	0.548
	7 9	0.469
4	1 3	0.028
	2 4	0.098
	3 5	0.208
	4 6	0.342
	5 7	0.452
5	1 3	0.476
	2 4	0.082
	3 5	0.783

Como se pode observar, as condições associadas à tensão de toque são muito críticas. Em se tratando das tensões de passo os riscos são menores, mas ainda assim significativos principalmente nas situações onde um dos pés está posicionado nas proximidades dos condutores.

Cumprе observar que para o perfil 3, os pontos 6 a 9 não são representativos de condições de toque, pois a distância à perna da estrutura seria superior a 1,5 m.

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 2 \text{ mS/m}$



Os valores máximos obtidos as tensões de toque e passo para esta condição são apresentados na tabela a seguir. Cumpramos ressaltar que o perfil 2 não será mais apresentado.

Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	3.649
	2	3.0	2.5	3.572
	3	3.5	2.5	3.438
	4	4.0	2.5	3.240
3	1	3.0	5.0	3.139
	2	3.5	5.0	2.827
	3	4.0	5.0	2.569
	4	4.5	5.0	2.515
	5	5.0	5.0	2.878
	6	5.5	5.0	3.391
	7	6.0	5.0	3.858
	8	6.5	5.0	4.259
	9	7.0	5.0	4.608

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.213
	2 4	0.334
3	1 3	0.635
	2 4	0.471
	3 5	0.309
	4 6	0.876
	5 7	1.025
4	6 8	0.920
	7 9	0.801
	1 3	0.211
	2 4	0.331
	3 5	0.470
	4 6	0.631
5	5 7	0.777
	1 3	0.835
	2 4	0.322
	3 5	1.535

Cumpramos observar que os valores indicados nas tabelas anteriores foram obtidos considerando na simulação a corrente injetada com a forma de onda de Berger, indicada na Figura 4.10, sendo adotado o valor de crista de 1 A .

Por sua vez, têm-se os seguintes riscos associados a estas tensões:

Risco Associado à Tensão de Toque

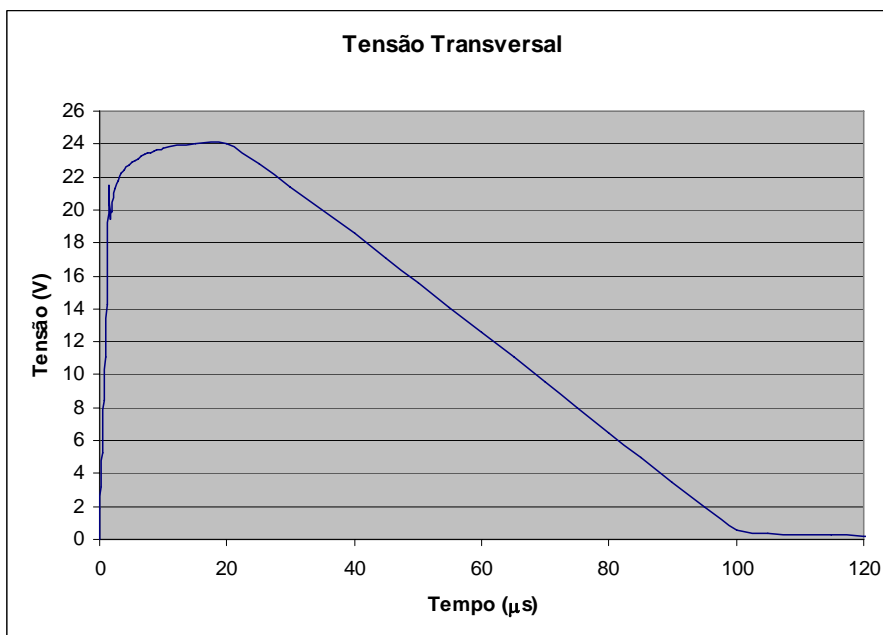
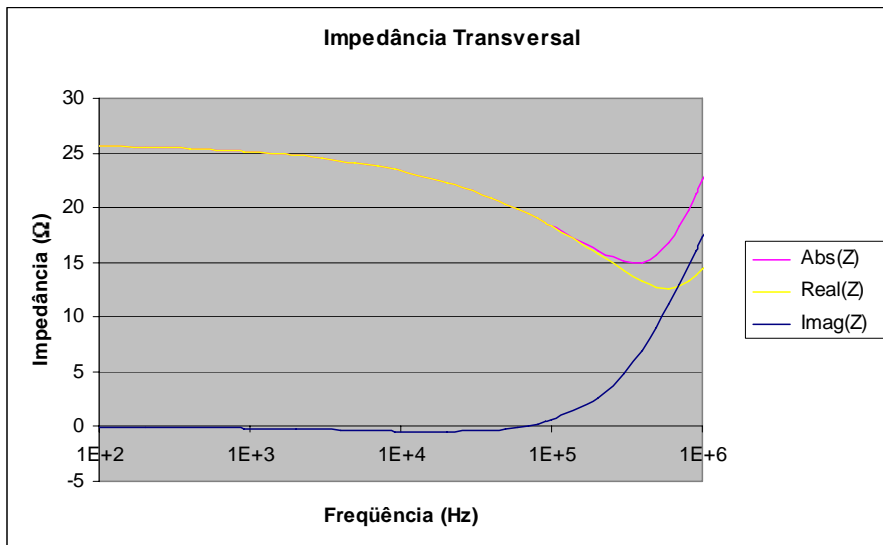
Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	>0.999
	2	>0.999
	3	>0.999
	4	>0.999
3	1	>0.999
	2	>0.999
	3	>0.999
	4	>0.999
	5	>0.999
	6	>0.999
	7	>0.999
	8	>0.999
	9	>0.999

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.126
	2 4	0.300
3	1 3	0.649
	2 4	0.487
	3 5	0.102
	4 6	0.794
	5 7	0.852
4	6 8	0.815
	7 9	0.759
	1 3	0.126
	2 4	0.300
	3 5	0.485
	4 6	0.645
5	5 7	0.746
	1 3	0.777
	2 4	0.288
	3 5	0.946

Como era esperado, o aumento da resistividade do solo produz tensões mais severas e probabilidades de exposição ainda mais elevadas.

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$



Os valores máximos obtidos as tensões de toque e passo para esta condição são apresentados na tabela a seguir.

Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	7.131
	2	3.0	2.5	6.980
	3	3.5	2.5	6.718
	4	4.0	2.5	6.332
3	1	3.0	5.0	6.135
	2	3.5	5.0	5.524
	3	4.0	5.0	4.893
	4	4.5	5.0	4.604
	5	5.0	5.0	5.264
	6	5.5	5.0	6.304
	7	6.0	5.0	7.267
	8	6.5	5.0	8.103
	9	7.0	5.0	8.833

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.415
	2 4	0.650
3	1 3	1.242
	2 4	0.921
	3 5	0.420
	4 6	1.701
	5 7	2.003
	6 8	1.799
	7 9	1.565
4	1 3	0.413
	2 4	0.647
	3 5	0.918
	4 6	1.232
	5 7	1.519
5	1 3	1.633
	2 4	0.631
	3 5	3.004

Cumpra observar que os valores indicados nas tabelas anteriores foram obtidos considerando na simulação a corrente injetada com a forma de onda de Berger, indicada na Figura 4.10, sendo adotado o valor de crista de 1 A .

Por sua vez, têm-se os seguintes riscos associados:

Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	>0.999
	2	>0.999
	3	>0.999
	4	>0.999
3	1	>0.999
	2	>0.999
	3	>0.999
	4	>0.999
	5	>0.999
	6	>0.999
	7	>0.999
	8	>0.999
	9	>0.999

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.192
	2 4	0.402
3	1 3	0.745
	2 4	0.596
	3 5	0.155
	4 6	0.863
	5 7	0.907
	6 8	0.880
	7 9	0.836
4	1 3	0.192
	2 4	0.402
	3 5	0.594
	4 6	0.741
	5 7	0.826
5	1 3	0.851
	2 4	0.389
	3 5	0.970

6.3.2 CONFIGURAÇÃO 2

Considerou-se esta configuração uma vez que em locais de resistividade mais elevada (em baixas frequências), a prática usual consiste em se aumentar o comprimento dos cabos contrapeso. A configuração apresentada na figura a seguir é comumente utilizada nestes casos. Foram realizadas simulações para σ_0 de 2 mS/m, 1 mS/m e 0,5 mS/m (correspondente às resistividades de 500 $\Omega.m$, 1000 $\Omega.m$ e 2000 $\Omega.m$, respectivamente).

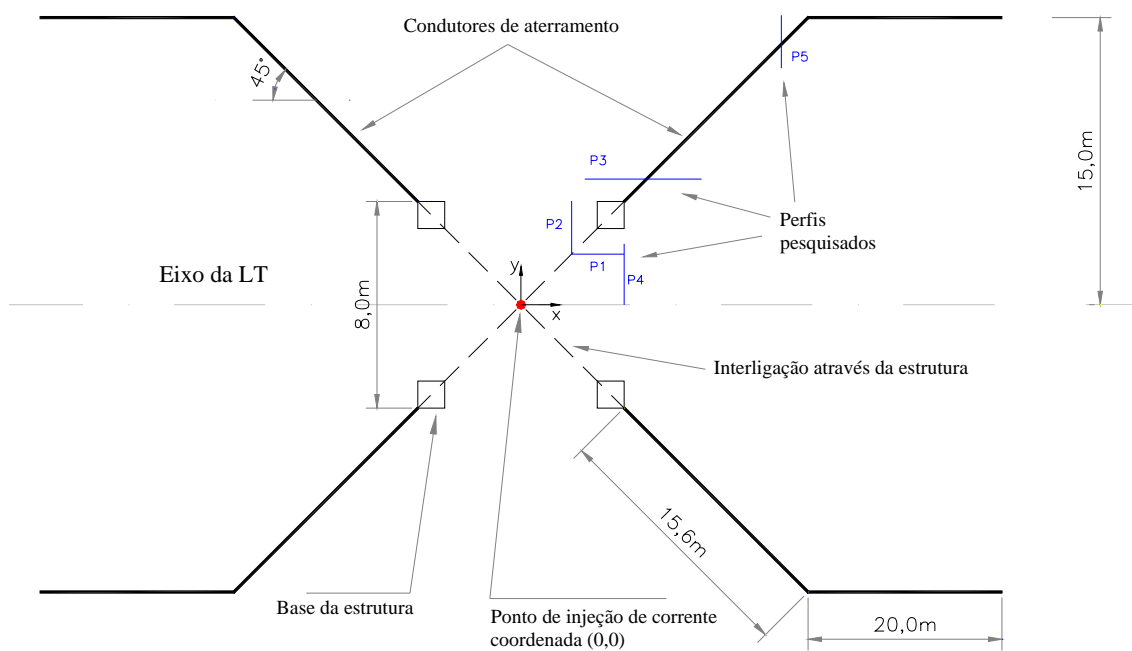
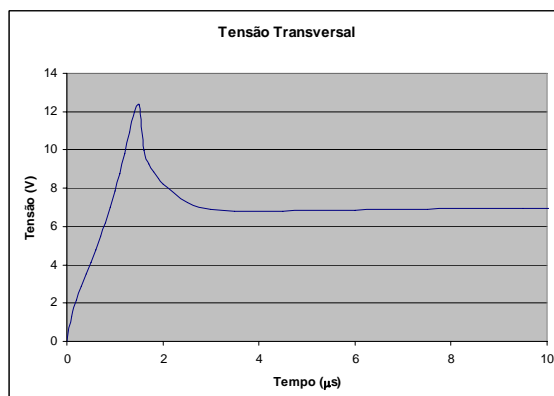
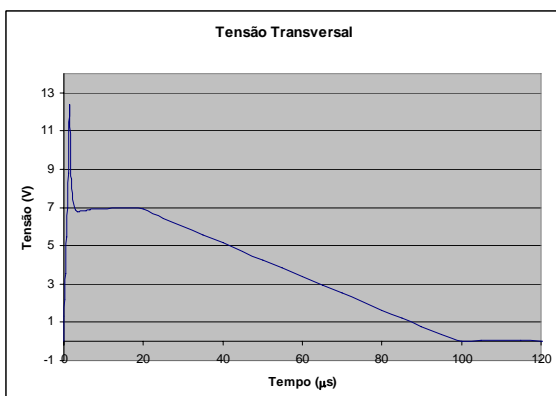
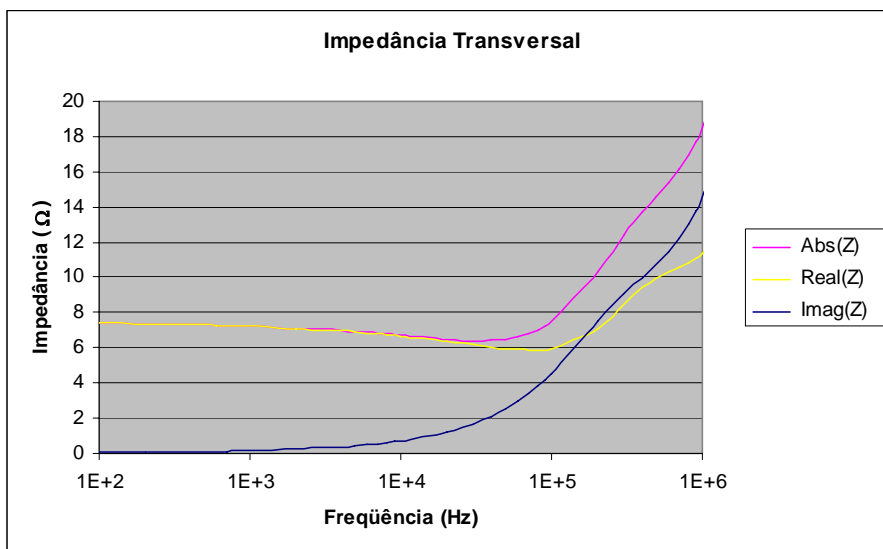


Figura 6.23 – Sistema de aterramento utilizado na Configuração 2.

Os perfis são os mesmos indicados para a configuração 1, apresentada na Figura 6.22.

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 2 \text{ mS/m}$



Por sua vez, as tensões de toque e passo para este caso são apresentadas na tabela a seguir.

Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	2.788
	2	3.0	2.5	2.724
	3	3.5	2.5	2.614
	4	4.0	2.5	2.451
3	1	3.0	5.0	2.456
	2	3.5	5.0	2.258
	3	4.0	5.0	2.069
	4	4.5	5.0	2.032
	5	5.0	5.0	2.362
	6	5.5	5.0	2.819
	7	6.0	5.0	3.229
	8	6.5	5.0	3.579
	9	7.0	5.0	3.880

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.176
	2 4	0.276
3	1 3	0.476
	2 4	0.327
	3 5	0.293
	4 6	0.787
	5 7	0.867
4	6 8	0.760
	7 9	0.651
	1 3	0.174
	2 4	0.273
	3 5	0.386
5	4 6	0.517
	5 7	0.632
	1 3	0.449
	2 4	0.145
	3 5	0.647

Cumpra observar que os valores indicados nas tabelas anteriores foram obtidos considerando na simulação a corrente injetada com a forma de onda de Berger, indicada na Figura 4.10, sendo adotado o valor de crista de 1 A .

Os riscos associados a estas tensões são:

Risco Associado à Tensão de Toque

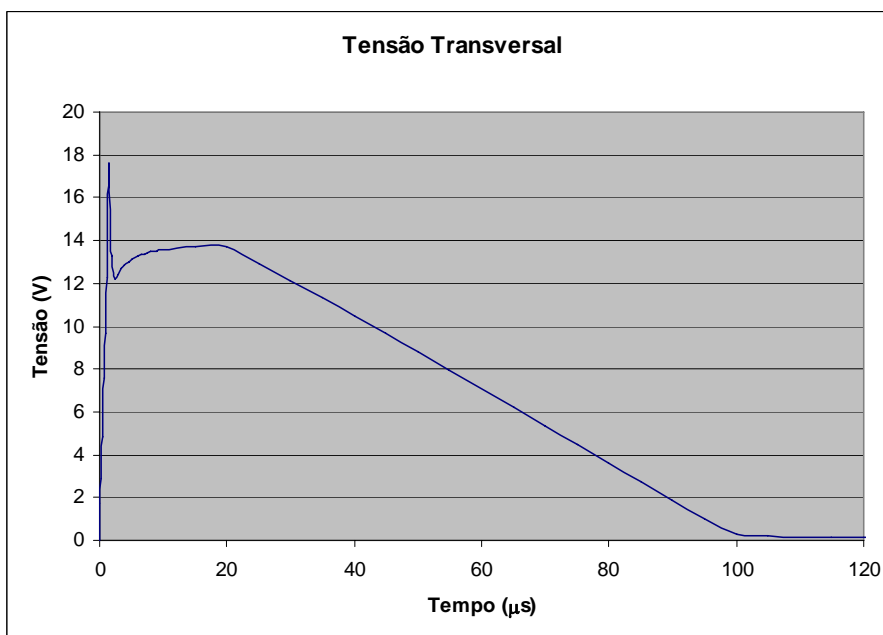
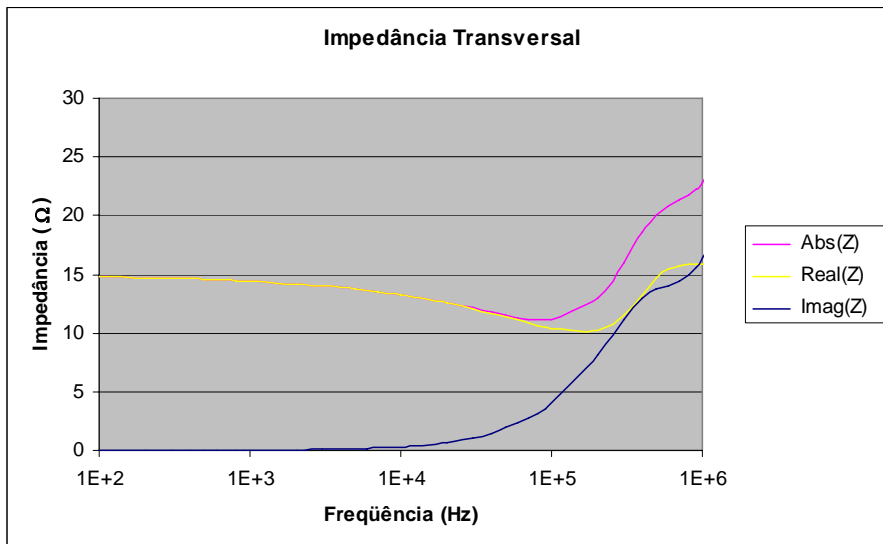
Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	0.998
	2	0.998
	3	0.998
	4	0.997
3	1	0.996
	2	0.994
	3	0.989
	4	0.984
	5	0.992
	6	0.996
	7	0.998
	8	0.999
	9	0.999

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.018
	2 4	0.071
3	1 3	0.326
	2 4	0.208
	3 5	0.007
	4 6	0.448
	5 7	0.539
4	6 8	0.473
	7 9	0.391
	1 3	0.018
	2 4	0.071
	3 5	0.163
5	4 6	0.284
	5 7	0.390
	1 3	0.460
	2 4	0.008
	3 5	0.658

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$

A impedância e a tensão do aterramento são apresentadas nas figuras a seguir.



Os valores máximos das tensões de toque e passo encontram-se nas tabelas a seguir.

Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	3.806
	2	3.0	2.5	3.716
	3	3.5	2.5	3.561
	4	4.0	2.5	3.332
3	1	3.0	5.0	3.294
	2	3.5	5.0	2.993
	3	4.0	5.0	2.694
	4	4.5	5.0	2.610
	5	5.0	5.0	3.062
	6	5.5	5.0	3.704
	7	6.0	5.0	4.283
	8	6.5	5.0	4.779
	9	7.0	5.0	5.206

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.247
	2 4	0.387
3	1 3	0.718
	2 4	0.524
	3 5	0.368
	4 6	1.093
	5 7	1.221
4	6 8	1.075
	7 9	0.923
	1 3	0.245
	2 4	0.384
	3 5	0.545
5	4 6	0.732
	5 7	0.900
	1 3	0.878
	2 4	0.216
	3 5	1.266

Cumpra observar que os valores indicados nas tabelas anteriores foram obtidos para a forma de onda de Berger, indicada na Figura 4.10, sendo adotado o valor de crista de 1 A .

Os riscos associados a estas tensões são indicados na tabela.

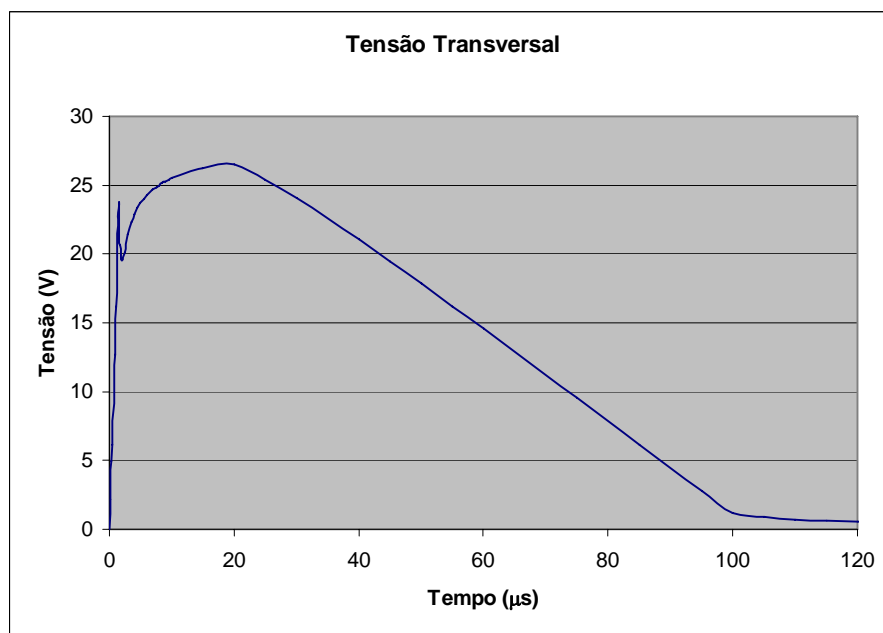
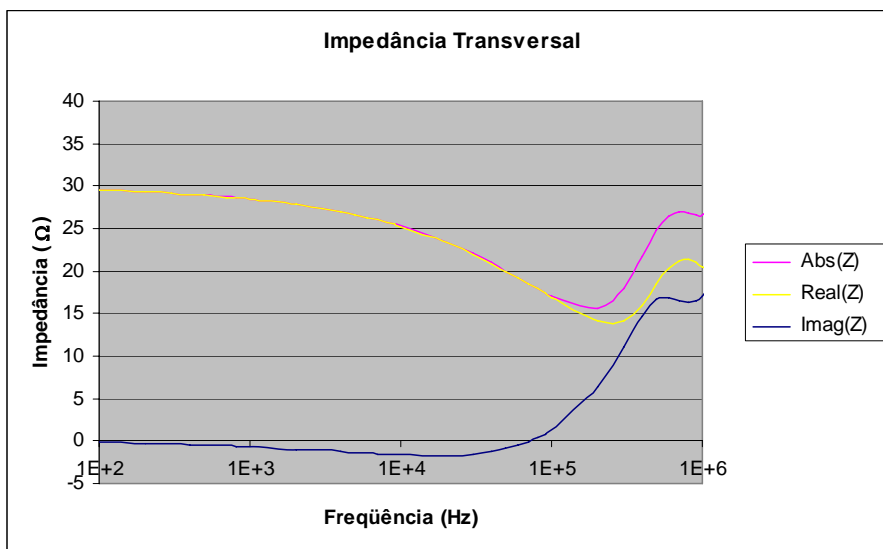
Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	>0.999
	2	0.999
	3	0.999
	4	0.999
3	1	0.999
	2	0.998
	3	0.996
	4	0.994
	5	0.997
	6	0.999
	7	>0.999
	8	>0.999
	9	>0.999

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.033
	2 4	0.112
3	1 3	0.426
	2 4	0.294
	3 5	0.012
	4 6	0.548
	5 7	0.637
4	6 8	0.574
	7 9	0.491
	1 3	0.033
	2 4	0.112
	3 5	0.233
5	4 6	0.376
	5 7	0.491
	1 3	0.570
	2 4	0.017
	3 5	0.753

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 0,5 \text{ mS/m}$



Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	5.694
	2	3.0	2.5	5.551
	3	3.5	2.5	5.304
	4	4.0	2.5	4.940
3	1	3.0	5.0	4.799
	2	3.5	5.0	4.177
	3	4.0	5.0	3.508
	4	4.5	5.0	3.174
	5	5.0	5.0	3.788
	6	5.5	5.0	4.773
	7	6.0	5.0	5.677
	8	6.5	5.0	6.451
	9	7.0	5.0	7.119

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.392
	2 4	0.614
3	1 3	1.292
	2 4	1.003
	3 5	0.431
	4 6	1.599
	5 7	1.889
4	6 8	1.678
	7 9	1.443
	1 3	0.390
	2 4	0.611
	3 5	0.868
5	4 6	1.168
	5 7	1.444
	1 3	1.676
	2 4	0.316
	3 5	2.417

Cumpra observar que os valores indicados nas tabelas anteriores foram obtidos para a forma de onda de Berger, indicada na Figura 4.10, sendo adotado o valor de crista de 1 A .

Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	>0.999
	2	1.000
	3	1.000
	4	1.000
3	1	>0.999
	2	1.000
	3	0.999
	4	0.998
	5	0.999
	6	>0.999
	7	>0.999
	8	>0.999
	9	>0.999

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.067
	2 4	0.192
3	1 3	0.566
	2 4	0.427
	3 5	0.026
	4 6	0.679
	5 7	0.757
	6 8	0.702
	7 9	0.626
4	1 3	0.067
	2 4	0.192
	3 5	0.350
	4 6	0.511
	5 7	0.626
5	1 3	0.702
	2 4	0.037
	3 5	0.850

6.3.3 CONFIGURAÇÃO 3

Nos casos de resistividade muito elevada pode-se utilizar esta configuração. Embora não seja comumente utilizada ela apresenta vantagens no que se refere ao comportamento transitório. A figura a seguir apresentada a disposição dos cabos. Foram realizadas simulações para σ_0 de 1 mS/m, 0,5 mS/m e 0,2 mS/m (correspondente às resistividades de 1000 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 5000 $\Omega.m$).

Análise de Sistemas de Aterramento sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão.

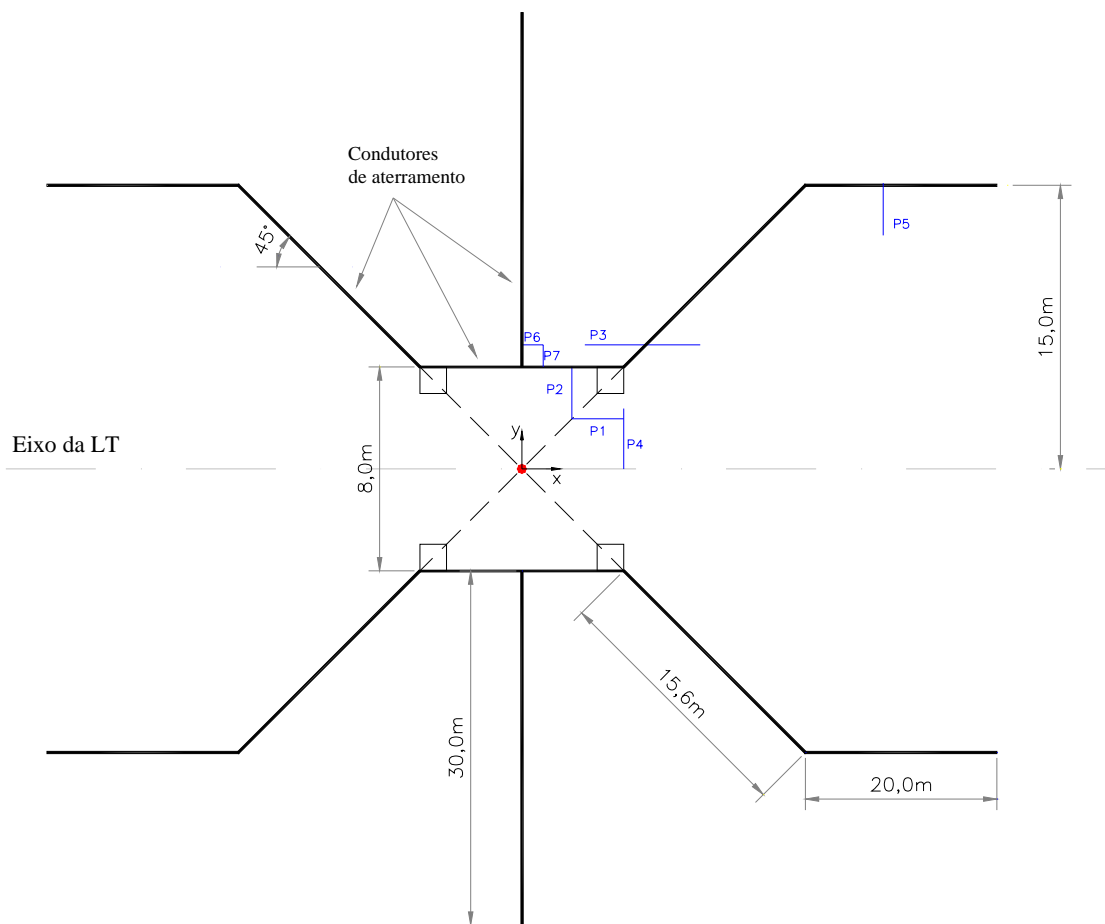
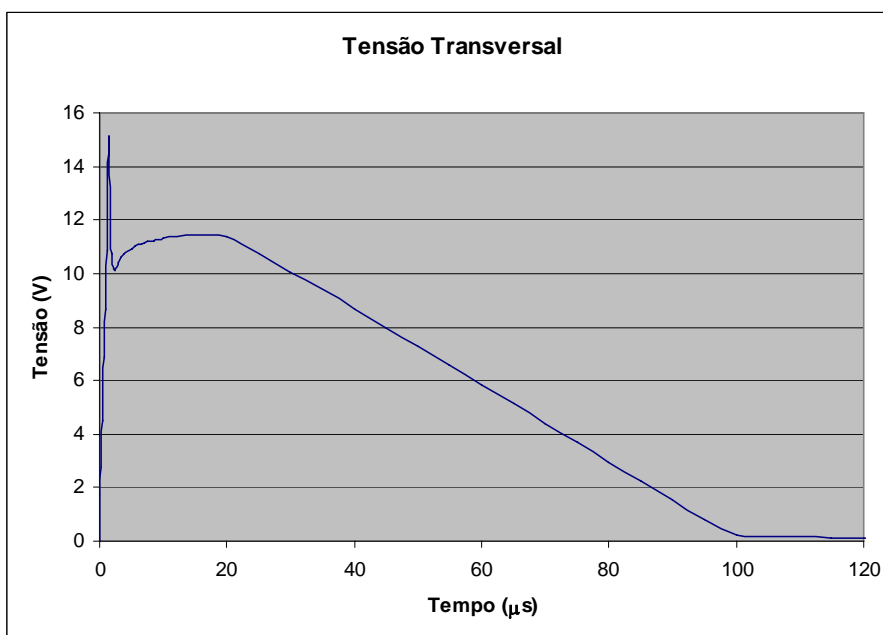
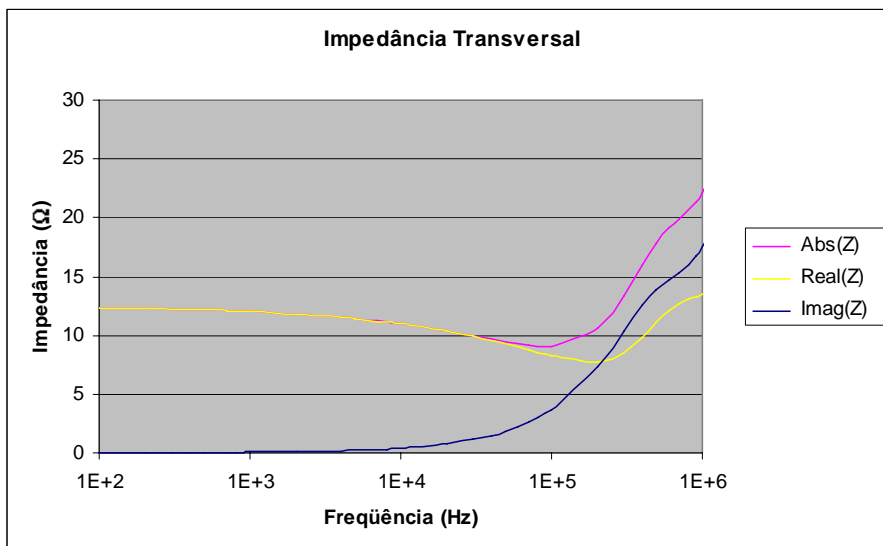


Figura 6.24 – Sistema de aterramento utilizado na Configuração 3.

Os perfis indicados para esta configuração são os mesmos apresentados para a configuração 1, excetuando-se indicados na tabela a seguir.

Perfil	Coordenada Inicial		Coordenada Inicial	
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
3	3,5	5,0	7,0	5,0
5	20,0	14,0	20,0	15,0
6	0,0	5,0	2,5	5,0
7	5,0	4,0	5,0	5,5

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$



Os perfis 6 e 7 foram inseridos para analisar as tensões de passo nas proximidades da conexão do cabo adicional inserido nesta configuração. Na tabela a seguir são apresentadas as tensões de toque e passo calculadas para os perfis selecionados.

Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	2.056
	2	3.0	2.5	1.976
	3	3.5	2.5	1.838
	4	4.0	2.5	1.635
2	1	2.5	2.5	1.976
	2	3.0	2.5	1.846
	3	3.5	2.5	1.638
	4	4.0	2.5	1.493
3	1	3.0	5.0	1.167
	2	3.5	5.0	1.151
	3	4.0	5.0	1.101
	4	4.5	5.0	1.162
	5	5.0	5.0	1.590

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.220
	2 4	0.344
2	1 3	0.238
	2 4	0.485
3	1 3	0.170
	2 4	0.136
	3 5	0.488
	4 6	0.981
	5 7	1.049
	6 8	0.922
4	1 3	0.218
	2 4	0.341
	3 5	0.485
	4 6	0.658
	5 7	0.841
5	1 3	1.002
6	2 4	0.455
	2 4	0.394
	3 5	0.229
	4 6	0.133
7	2 4	0.425
	2 4	0.263

Não foram analisados as tensões de toque para os perfis 6 e 7 devido à distancia destes pontos às pernas da estrutura. As probabilidades associadas ao risco quanto à segurança de pessoas é apresentada a seguir.

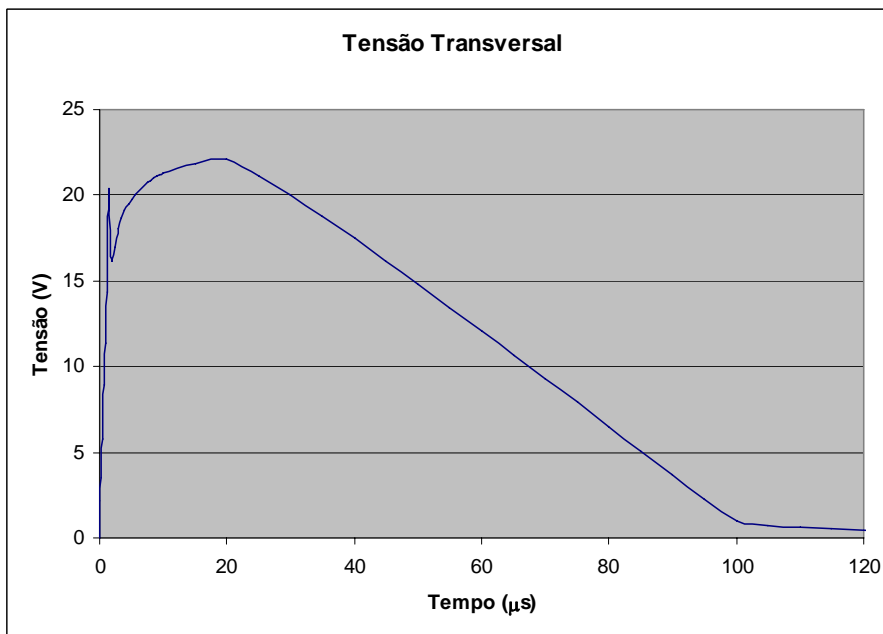
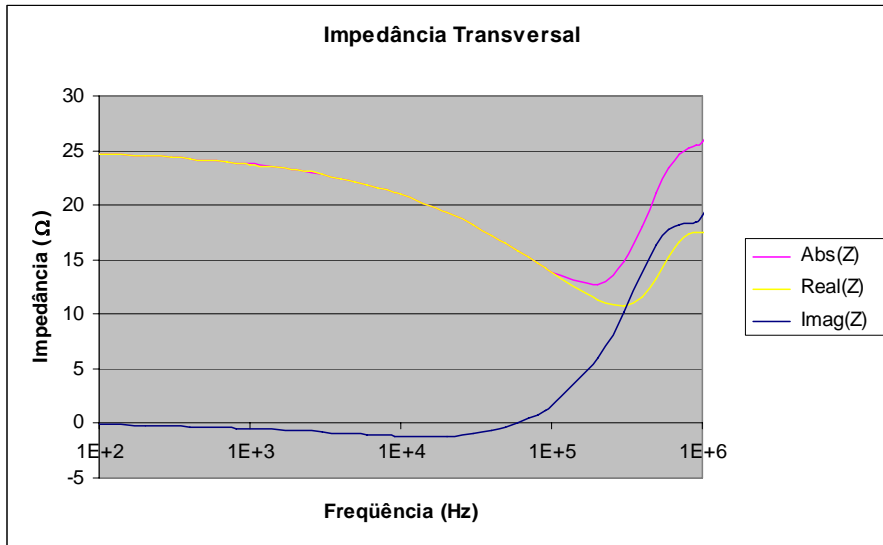
Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	0.988
	2	0.986
	3	0.981
	4	0.970
2	1	0.987
	2	0.983
	3	0.968
	4	0.940
3	1	0.857
	2	0.823
	3	0.732
	4	0.706
	5	0.907

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.021
	2 4	0.080
2	1 3	0.051
	2 4	0.310
3	1 3	0.017
	2 4	0.008
	3 5	0.085
	4 6	0.483
	5 7	0.544
	6 8	0.478
4	1 3	0.021
	2 4	0.080
	3 5	0.179
	4 6	0.310
	5 7	0.441
6	2 4	0.177
	2 4	0.134
	3 5	0.035
	4 6	0.004
7	2 4	0.202
	2 4	0.001

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 0,5 \text{ mS/m}$



Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	2.649
	2	3.0	2.5	2.524
	3	3.5	2.5	2.309
	4	4.0	2.5	1.992
2	1	2.5	2.5	2.489
	2	3.0	2.5	2.264
	3	3.5	2.5	1.909
	4	4.0	2.5	1.533
3	1	3.0	5.0	1.205
	2	3.5	5.0	1.164
	3	4.0	5.0	1.069
	5	5.0	5.0	1.662

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.344
	2 4	0.538
2	1 3	0.380
	2 4	0.757
3	1 3	0.329
	2 4	0.265
	3 5	0.593
	4 6	1.422
	5 7	1.589
	6 8	1.411
4	1 3	0.340
	2 4	0.532
	3 5	0.757
	4 6	1.028
	5 7	1.319
5	1 3	1.910
6	2 4	0.752
	2 4	0.662
	3 5	0.397
	4 6	0.216
7	2 4	0.816
	2 4	0.291

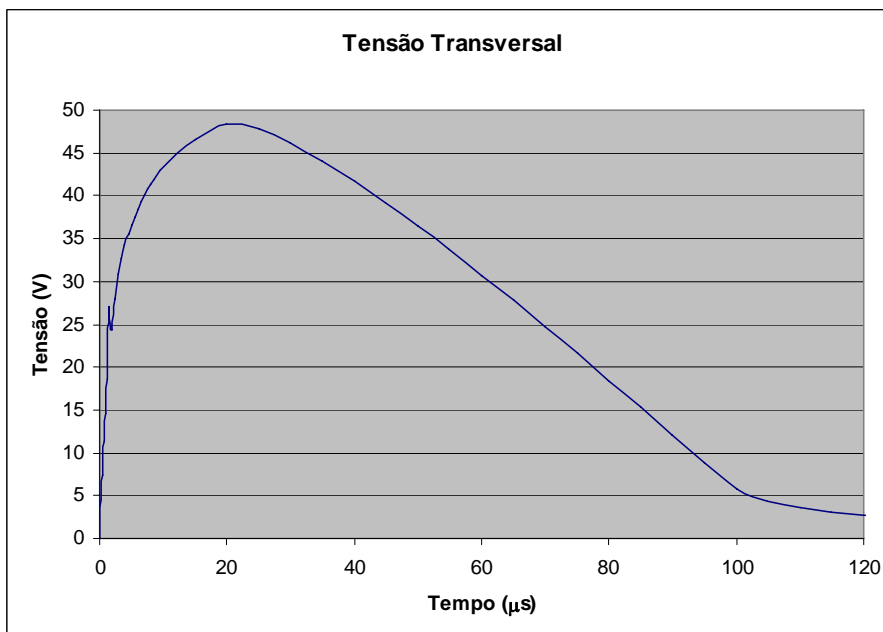
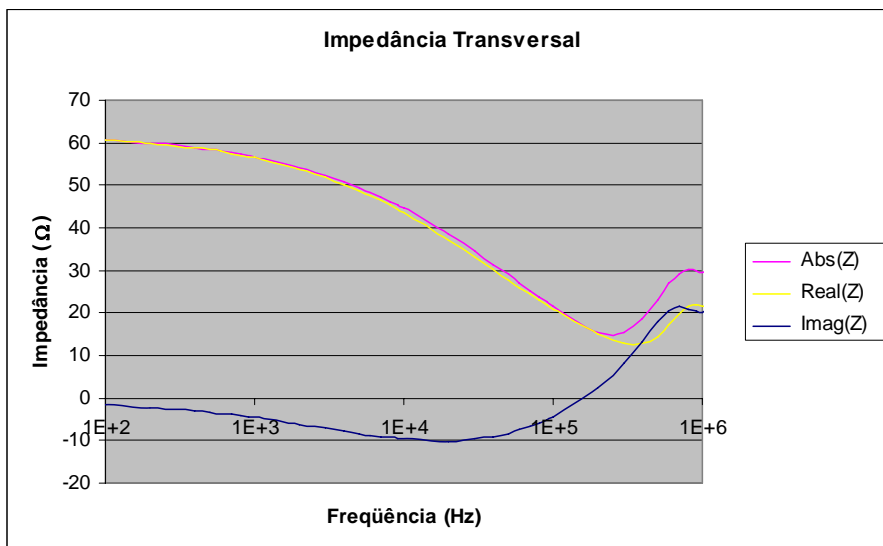
Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	0.996
	2	0.995
	3	0.993
	4	0.989
2	1	0.995
	2	0.992
	3	0.980
	4	0.959
3	1	0.921
	2	0.896
	3	0.821
	4	0.797
	5	0.953

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.046
	2 4	0.144
2	1 3	0.073
	2 4	0.440
3	1 3	0.041
	2 4	0.021
	3 5	0.149
	4 6	0.618
	5 7	0.675
	6 8	0.614
4	1 3	0.046
	2 4	0.144
	3 5	0.283
	4 6	0.440
	5 7	0.578
6	2 4	0.280
	2 4	0.223
	3 5	0.071
	4 6	0.010
7	2 4	0.318
	2 4	0.001

Resultados Obtidos - $\sigma_0 = 0,2mS/m$



Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Coordenada		Tensão Máxima (V)
		x (m)	y (m)	
1	1	2.5	2.5	5.606
	2	3.0	2.5	5.337
	3	3.5	2.5	4.873
	4	4.0	2.5	4.188
2	1	2.5	2.5	5.526
	2	3.0	2.5	5.237
	3	3.5	2.5	4.743
	4	4.0	2.5	2.234
3	1	3.0	5.0	2.187
	2	3.5	5.0	1.936
	3	4.0	5.0	1.472
	4	4.5	5.0	1.358
	5	5.0	5.0	2.623

Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Tensão Máxima (V)
1	1 3	0.735
	2 4	1.152
2	1 3	0.773
	2 4	1.633
3	1 3	0.723
	2 4	0.584
	3 5	1.160
	4 6	3.073
	5 7	3.434
	6 8	3.047
4	1 3	0.733
	2 4	1.149
	3 5	1.633
	4 6	2.219
	5 7	2.848
5	1 3	4.117
6	2 4	1.622
	2 4	1.426
	3 5	0.856
	4 6	0.466
7	2 4	1.772
	2 4	0.315

Risco Associado à Tensão de Toque

Perfil	Ponto	Probabilidade
1	1	1.000
	2	1.000
	3	0.999
	4	0.999
2	1	0.999
	2	0.999
	3	0.998
	4	0.998
3	1	0.981
	2	0.972
	3	0.937
	4	0.922
	5	0.990

Risco Associado à Tensão de Passo

Perfil	Entre Pontos	Probabilidade
1	1 3	0.152
	2 4	0.342
2	1 3	0.182
	2 4	0.533
3	1 3	0.146
	2 4	0.088
	3 5	0.348
	4 6	0.831
	5 7	0.867
	6 8	0.828
4	1 3	0.152
	2 4	0.342
	3 5	0.533
	4 6	0.694
	5 7	0.804
6	2 4	0.529
	2 4	0.458
	3 5	0.208
	4 6	0.049
7	2 4	0.577
	2 4	0.007

6.3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos resultados apresentados para as configurações consideradas, pode-se constatar que os riscos associados às tensões de toque são extremamente elevados para todos os tipos de solo considerados. Por sua vez, as tensões de passo tipicamente preocupantes ocorrem da situação de um dos pés estar sobre o cabo contrapeso, sendo ainda mais agravado em solos de resistividade elevada.

Comparando-se os resultados obtidos para as três configurações, considerando $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$, que corresponde a um valor de resistividade de solo em baixas frequências de $1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (valor mediando encontrado no país), pode-se observar a variação do comportamento dos sistemas de aterramento, rerepresentada a seguir:

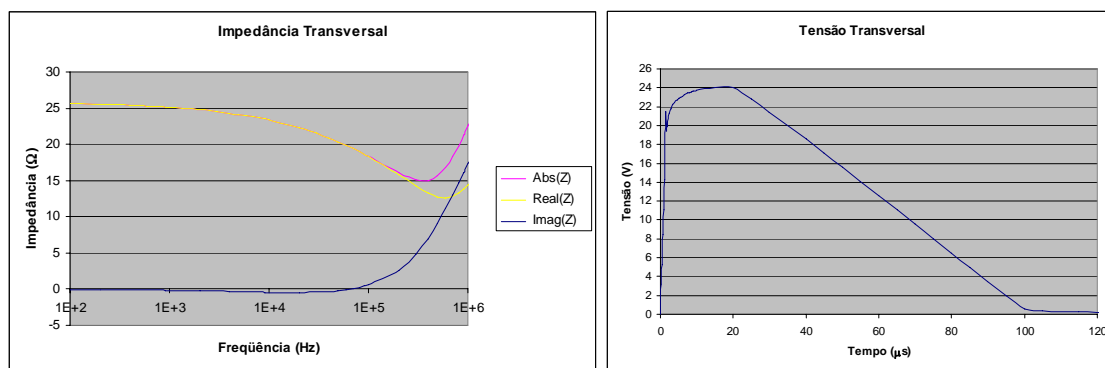


Figura 6.25 – Resultado obtido na Configuração 1 - $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$ ($1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$).

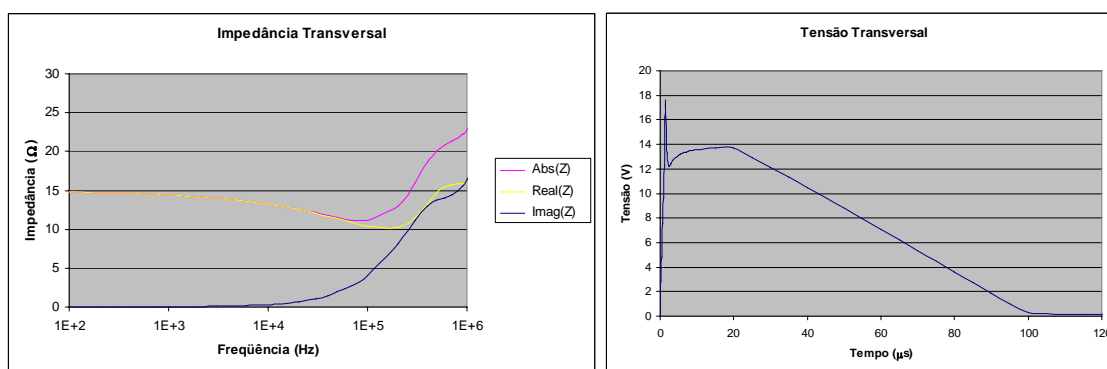


Figura 6.26 – Resultado obtido na Configuração 2 - $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$ ($1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$).

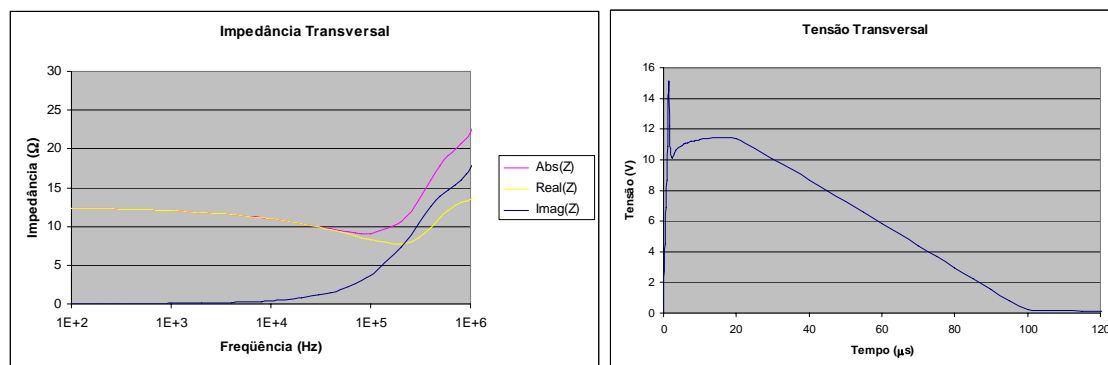


Figura 6.27 – Resultado obtido na Configuração 3 - $\sigma_0 = 1 \text{ mS/m}$ ($1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$).

Comparando-se ainda a tensão de toque máxima obtida para o perfil 1, tem-se para cada uma das configurações os seguintes valores, considerando-se uma amplitude máxima da corrente injetada de 1 A:

Configuração 1 : 7,131 V;

Configuração 2 : 3,806 V;

Configuração 3 : 2,056 V.

Analisando as respostas no domínio da freqüência contata-se que com relação à configuração 1, a impedância obtida na configuração 2 apresenta uma redução significativa a baixas freqüências e até da ordem 200 kHz. Para freqüências superiores a esta se observa um aumento da impedância e praticamente o mesmo comportamento próximo a 1 MHz.

Por sua vez, comparando a configuração 3, observa-se uma redução significativa até 200 kHz, sendo praticamente o mesmo para freqüências superiores. Com relação à configuração 2, pode-se perceber uma redução ao longo de todo o espectro.

No domínio do tempo, observa-se a redução do valor da tensão para o tempo de 1,5 μs , sendo que para a configuração 1 constata-se um comportamento distinto com relação às demais configurações: o valor máximo não ocorre neste instante, mas para cerca de 20 μs . Nas configurações 1 e 2, neste instante, o valor é bem inferior ao valor de crista.

O comportamento observado na configuração 1 era esperado, e se justifica principalmente pelo fato da impedância para freqüências até 100 kHz apresentar-se sensivelmente elevada.

Comparando-se as configurações 2 e 3, nota-se o efeito da inserção dos cabos perpendiculares ao eixo da LT na configuração 3.

No que se refere às tensões de toque, a redução ocorrida se deve basicamente à redução da tensão na estrutura e à distribuição das correntes entre os cabos, ocasionada pelo aumento de comprimento/número de contrapesos. Contudo, esta redução ainda assim continua a ser elevada, apresentando sérios riscos à segurança de pessoas.

De modo a permitir uma análise mais detalhada da impedância de aterramento nas frequências próximas a 1MHz e da tensão transitória, foram também simuladas as configurações 2 e 3 para $\sigma_0 = 0,2 \text{ mS/m}$ ($5000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$). O resultado para a configuração 2 é apresentado a seguir e o referente à configuração 3 foi retirado do Item 6.3.3.

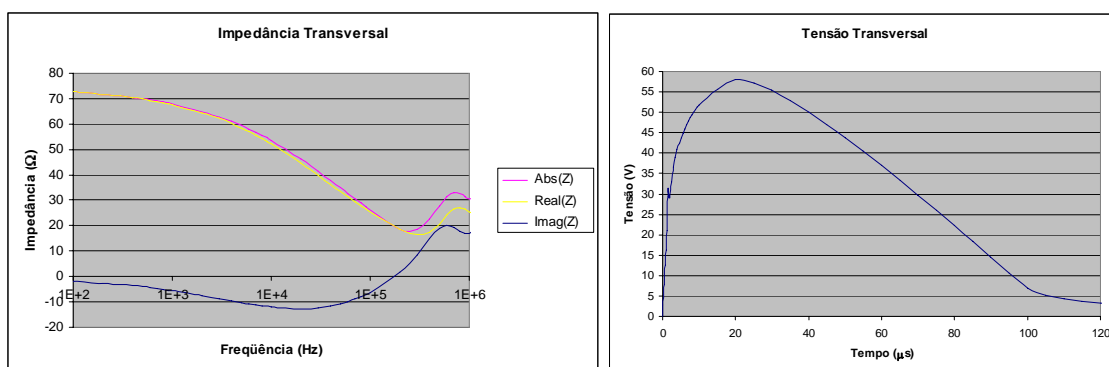


Figura 6.28 – Resultado obtido na Configuração 2 - $\sigma_0 = 0,2 \text{ mS/m}$ ($5000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$).

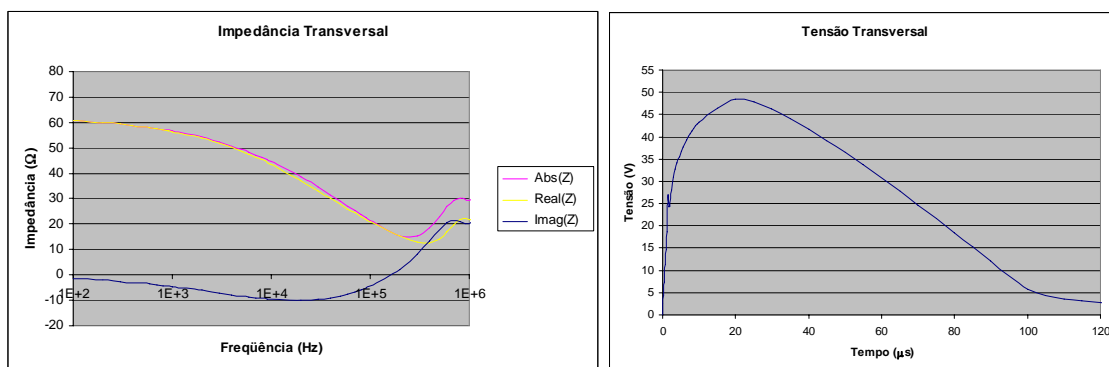


Figura 6.29 – Resultado obtido na Configuração 3 - $\sigma_0 = 0,2 \text{ mS/m}$ ($5000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$).

Neste caso, nota-se mais pronunciadamente o efeito dos dois cabos contrapeso adicionais instalados na configuração 3.

Efeito do Aumento de Comprimento de Cabos Contrapeso

Este tópico tem o objetivo de avaliar um conceito amplamente discutido, só que de forma qualitativa, a cerca do desempenho dos sistemas de aterramento, o qual afirma que o aumento do comprimento dos cabos contrapeso acima de 120 m, embora venha reduzir a impedância de aterramento em baixas frequências, não melhora o comportamento impulsivo dos aterramentos.

Para esta análise serão simuladas as configurações 2 e 3, considerando um solo com $\sigma_0 = 0,5 \text{ mS/m}$ ($2000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$), mas utilizando os comprimentos de cabo de 80 m, 120 m e 160 m para a configuração 2 e de 54 m e 80 m para a configuração 3. Cumpre observar que os comprimentos de 80 m para a configuração 2 e de 54 m para a configuração 3 apresentam um mesmo comprimento total de cabo 320 m. Por sua vez, os de 120 m para a configuração 2 e de 80 m para a configuração 3 representam um total de 480 m.

Os resultados das simulações no domínio da frequência e do tempo, respectivamente, impedância de aterramento e tensão do aterramento, são apresentados nas figuras a seguir.

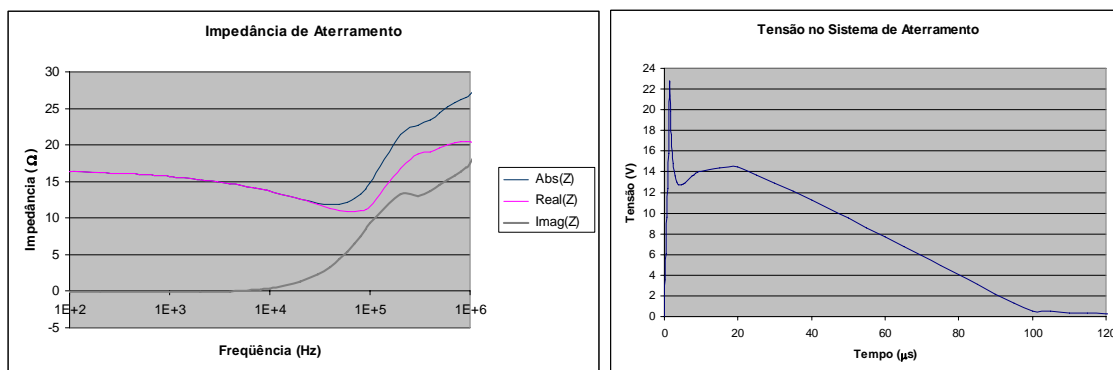


Figura 6.30 – Resultado para a Configuração 2 com 80 m de comprimento por cabo.

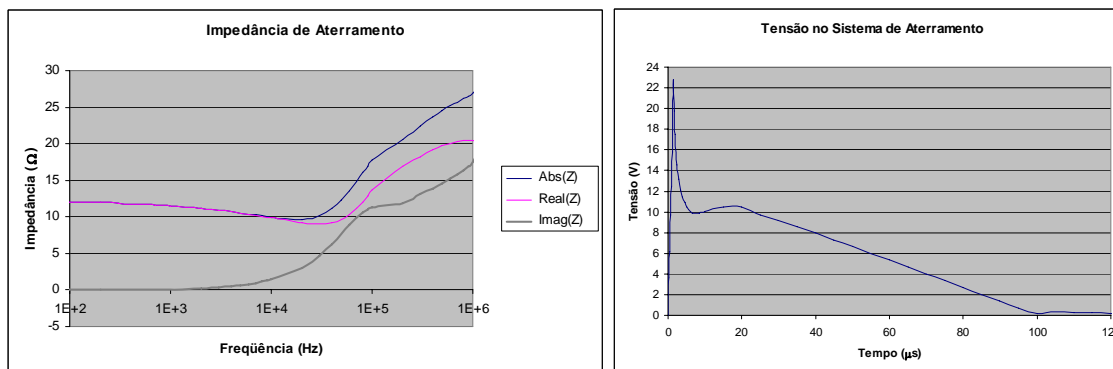


Figura 6.31 – Resultado para a Configuração 2 com 120 m de comprimento por cabo.

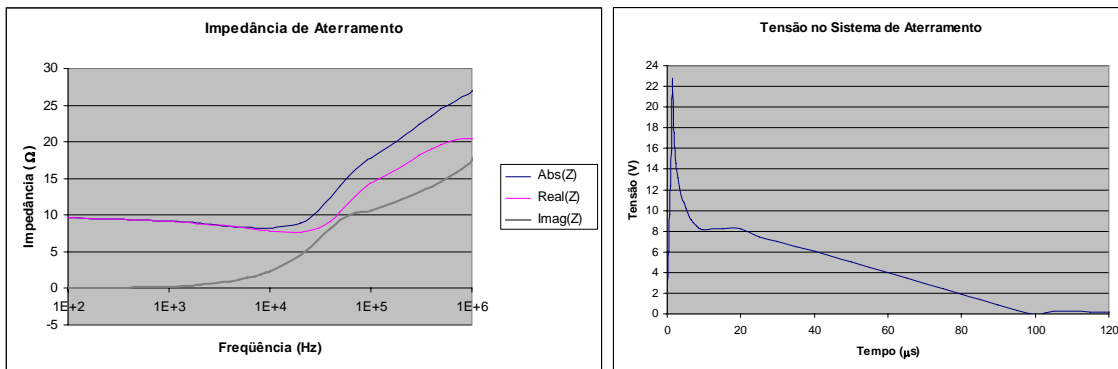


Figura 6.32 – Resultado para a Configuração 2 com 160 m de comprimento por cabo.

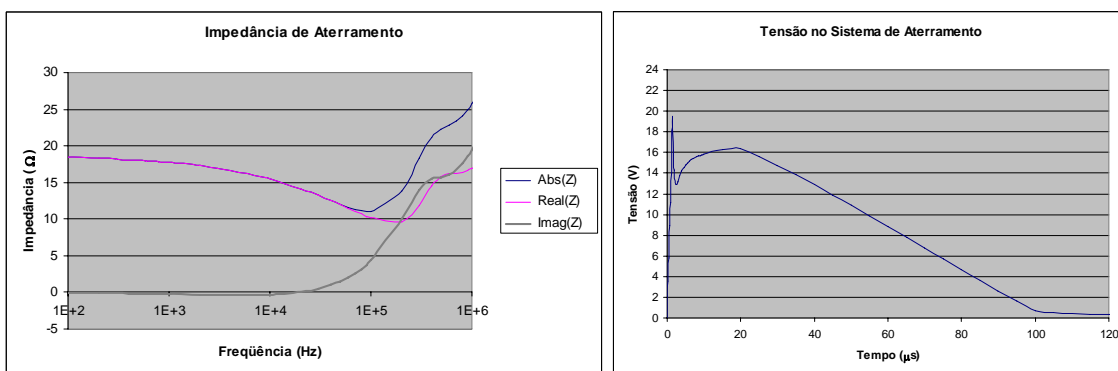


Figura 6.33 – Resultado para a Configuração 3 com 54 m de comprimento por cabo.

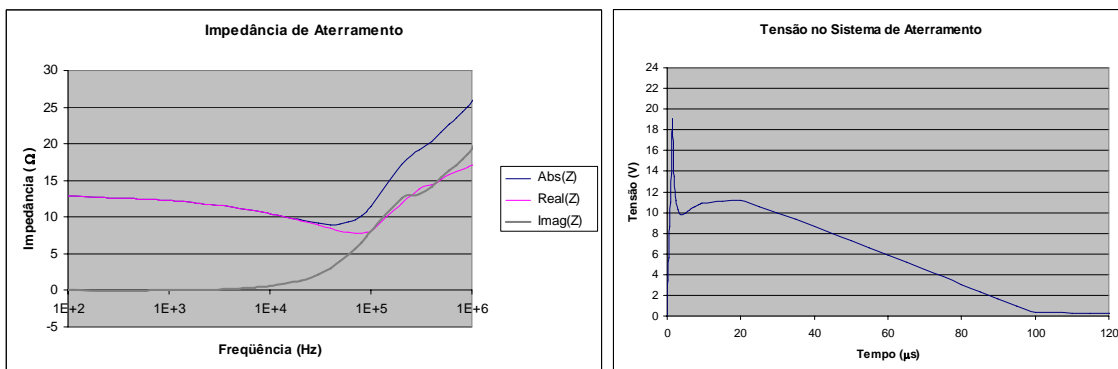


Figura 6.34 – Resultado para a Configuração 3 com 80 m de comprimento por cabo.

Analisando o comportamento obtido para a configuração 2, observa-se que a impedância para frequências de até 300 kHz é sensivelmente alterada pelo aumento do comprimento dos cabos contrapeso, porém nas frequências superiores praticamente independe deste aumento. Tal comportamento se reflete sob o desempenho transitório, como pode ser notado nos correspondentes gráficos de tensão do aterramento, onde o valor de crista da tensão impulsiva é praticamente o mesmo, que corresponde a aproximadamente 22,7 V. É

Análise de Sistemas de Aterramento sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão.

importante observar que para os instantes a partir de 5 μ s a tensão é sensivelmente alterada pelo comprimento de cabo, isto porque ela passa a ser determinada basicamente pelo comportamento das frequências abaixo de 200 kHz.

Avaliando os resultados obtidos para a configuração 3, nota-se que o aumento de 54 m para 80 m nos cabos na impedância de aterramento é bastante perceptível também para frequências mais altas, da ordem de até 700 kHz. Por isso que é possível observar uma pequena redução do valor de crista da tensão do aterramento, de 19,4 V para 18,9 V. Como já analisado na configuração 2, para instantes superiores a 5 μ s a diferença se deve ao comportamento ser fundamentalmente influenciado pelas frequências abaixo de 200 kHz.

Confrontando-se agora as configurações 2 e 3 que apresentam um mesmo comprimento total de cabo contrapeso e comparando inicialmente a configuração 2 com 80 m e a configuração 3 com 54 m (total de 320 m de cabo), pode-se observar que ao longo de todo o espectro a impedância é sensivelmente alterada. Em frequências baixas (abaixo de 50kHz), embora se saiba que o comportamento da impedância é muito sensível ao comprimento total de cabo, a impedância da configuração 3 revelou-se mais alta. Isto se deve à maior concentração de condutores (próximos ao centro do aterramento) nesta configuração, o que aumenta os acoplamentos entre eles. Entretanto, para as frequências acima de 50 kHz é possível notar a redução da impedância na configuração 3. Este comportamento é refletido na tensão transitória, com a redução do valor de crista, de 22,7 V para 19,4 V e o aumento da tensão para os instantes superiores.

Considerando agora a configuração 2 com 120 m e a configuração 3 com 80 m (total de 480 m de cabo), tem-se que em baixas frequências os valores de impedância são praticamente os mesmos, isto porque na configuração 3 se aumentou a parcela de cabo mais afastada da área concentrada (região próxima ao centro do aterramento). Para frequências acima de 20 kHz nota-se uma sensível redução da impedância de aterramento na configuração 3. O comportamento da tensão transitória indica a redução significativa do valor de crista, de 22,7 V para 18,9 V. Por sua vez, a equiparação entre os valores de impedância em baixa frequência aparece na proximidade entre os valores de tensão para instantes a partir de 20 μ s.

Como é possível observar através das análises apresentadas, nos sistemas de aterramento convencionalmente utilizados em linhas de transmissão, que corresponde aproximadamente à configuração 2, a alternativa amplamente utilizada em projetos, de se aumentar os comprimentos de cabos contrapeso com a finalidade de se reduzir a impedância de aterramento em baixas frequências, não melhora o desempenho impulsivo do aterramento caso já estejam sendo empregados grandes comprimentos de cabo (cerca de 80 m). Observou-se que para frequências altas, acima de 200 kHz, a impedância de aterramento praticamente não se altera e por conseguinte, o valor de crista da tensão transitória no aterramento também não é reduzido.

Como alternativa de solução eficiente para se melhorar o desempenho transitório dos aterramentos em vez de se aumentar o comprimento dos cabos contrapeso deve-se adicionar mais cabos, aumentando a ramificação do aterramento. Ao se utilizar deste artifício, é possível se empregar um mesmo comprimento total de cabo mas obter um desempenho mais adequado sob solicitações impulsivas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Devido à importância do sistema de aterramento para o adequado desempenho do sistema elétrico, tanto em regime permanente como sob condições de curtos-circuitos à frequência industrial ou sob correntes de origem transitória, torna-se fundamental que os mesmos sejam tratados segundo análises criteriosas e coerentes, principalmente no que se refere às características elétricas do solo, à utilização do sistema com neutro referenciado, ao tipo de instalação e à natureza das solicitações.

Em se tratando de estruturas de linhas de transmissão, os cabos pára-raios são projetados para oferecer uma blindagem à incidência de descargas diretas nas fases. Por sua vez, ao incidirem nesses cabos, as descargas se propagam e através das estruturas atingindo os seus sistemas de aterramento. Durante este processo, se a tensão entre fase e cabos pára-raios no vão ou entre fase e estrutura, na cadeia de isoladores ou janela da torre, for suficiente para ocasionar ruptura do isolamento, ocorrerá um arco sustentado pela tensão do sistema. Neste caso, a corrente de falta irá percorrer os cabos pára-raios, estruturas e escoará pelos respectivos aterramentos.

Dessa forma, em linhas de transmissão coerentemente projetadas, que apresentam distâncias de isolamento adequadas, as correntes impulsivas apresentam uma probabilidade maior de solicitarem os aterramentos das estruturas se comparadas às correntes a 60 Hz. Pois somente nos casos de haver ruptura entre fase e pára-raio/estrutura é que correntes desta natureza escoarão pelos aterramentos.

Por sua vez, em subestações, os curtos-circuitos à frequência industrial que apresentam elevadas correntes injetadas no solo ocorrem na mesma ordem de grandeza que o número de descargas que incide nestas instalações.

Com isso, pode-se perceber a importância de se avaliar o desempenho dos sistemas de aterramento sob tais solicitações impulsivas, não somente no que respeita à incidência, mas

principalmente devido aos valores de pico destas correntes que são tipicamente muito superiores às correntes a 60Hz, podendo atingir a ordem de 100 kA.

Contudo, o que comumente norteia os projetos de sistemas de aterramento são alguns critérios estabelecidos em normas e recomendações freqüentemente adotadas por concessionárias de energia, que definem determinados valores máximos de resistência de aterramento e condições segurança de pessoas exclusivamente para correntes à freqüência industrial, sendo dispensadas quaisquer análises quanto ao comportamento transitório dos mesmos.

No que se refere a subestações, o reticulado da malha de terra promove uma certa “equalização” das tensões na superfície do solo e no próprio sistema de aterramento, o que contribui para reduzir as tensões de toque e passo. Além disso, é comumente empregada uma camada de revestimento, tipicamente composta por brita, que geralmente apresenta resistividade elétrica superior a do solo e que permite um aumento das impedâncias de contato. Estas características contribuem para a redução da corrente que circula pelo corpo e conseqüentemente dos riscos associados à segurança de pessoas para solicitações impulsivas. Todavia o que efetivamente minimiza os riscos associados estas solicitações e conferem certa proteção às pessoas que circulam por estas instalações são alguns procedimentos operacionais de segurança como a obrigatoriedade na utilização dos equipamentos de proteção individual (luvas, botas isolantes e demais acessórios) e a interrupção de serviços de manutenção sob condições meteorológicas adversas.

No entanto, em se tratando do aterramento de estruturas, o mais agravante é que não são freqüentemente observadas as recomendações quanto à segurança de pessoas, nem mesmo para correntes a 60 Hz e tampouco no que se refere ao comportamento impulsivo. Sendo ainda mais críticos o fato de os cabos dos aterramentos serem dispostos radialmente (sem formar reticulados) e de não se instalar camada de revestimento sobre o solo. O que de certa forma explica esta postura se deve à grande parte das linhas de transmissão estarem localizadas em áreas remotas e de difícil acesso por parte de transeuntes, não implicando, em tese, na necessidade de se observar tais critérios de risco. A princípio este argumento parece ser válido, porém não é justificável pois mesmo em áreas remotas pode haver circulação de pessoas e ainda assim não é feita qualquer a avaliação em termos

probabilísticos a respeito dos riscos que pessoas comuns, desavisadas e alheias a isso, estão correndo nas proximidades destas instalações. Contudo, o que não pode ser tolerável é a não consideração destes riscos em linhas urbanas e, principalmente, em estruturas situadas em áreas de livre acesso a pessoas.

De uma maneira geral, as dificuldades inerentes ao aspecto computacional e principalmente à modelagem física são fatores que contribuem para que este assunto ainda esteja razoavelmente distante das práticas construtivas utilizadas. Contudo, o que realmente explica tal atitude é a falta de interesse do setor em tratar seriamente o assunto.

O trabalho apresentado aborda a modelagem do sistema de aterramento no domínio da frequência, sendo obtido a resposta no tempo a partir da transformada inversa de Fourier. A análise em função da frequência, considerando a representação do solo, os efeitos associados à propagação das ondas no solo e os fenômenos de reflexão e refração nas interfaces entre meios de diferentes características elétricas, se apresenta de fundamental importância para a determinação do comportamento dos sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas.

Os resultados das simulações revelaram que as configurações de sistemas de aterramento empregadas em estruturas de linhas de transmissão não atendem aos critérios de segurança de pessoas, no que se refere principalmente às tensões de toque associadas a correntes de natureza transitórias, tipicamente provocadas por descargas atmosféricas.

Por isso, é inadmissível que não sejam adotados critérios específicos de segurança nos projetos de aterramentos e em casos mais concretos não haja preocupação das concessionárias em se isolar as áreas adjacentes às estruturas. Ao contrário, é muito comum notar um comportamento passivo, tolerante e omissivo no que se refere à ocupação destas áreas, que por vezes serve como área de recreação e até mesmo como moradia em zonas carentes.

Como medidas para minimizar estes problemas de risco foram analisadas a instalação de camada de revestimento sobre o solo, o isolamento da área adjacente à estrutura, a

aplicação de revestimento isolante nas pernas da estrutura e a instalação de um reticulado de condutores ao redor das pernas da estrutura.

A solução de recobrir o solo com uma camada de revestimento surtiria pouco efeito principalmente em solos de elevada resistividade, além de não ser uma medida de longo prazo devido às ações de vandalismo e depredação tipicamente caracterizadas no país. Por sua vez, o isolamento da área ao redor da estrutura seria uma alternativa de excelente aplicabilidade, mas devido ao vandalismo também seria pouco duradoura.

A aplicação de uma camada de revestimento isolante nas pernas da estruturas impediria o contato direto com a parte metálica da torre. Ela representa uma alternativa de fácil aplicação, porém haveriam de ser pesquisados materiais adequados a esta aplicação, que apresentassem excelente rigidez dielétrica, resistência a intempéries e poder de aderência.

Concretamente a alternativa mais viável e que não apresenta grandes dificuldades a sua implementação consiste em se instalar uma rede metálica formando um reticulado de condutores nas proximidades das pernas da estruturas. Pesquisando as configurações de sistema de aterramento simuladas, seria necessário instalar um reticulado de cerca de 20 cm para reduzir os riscos das tensões de toque na vizinhança da estrutura, de modo a se ter entre 10% e 20% de probabilidade de exceder as condições de segurança (parâmetro da Figura 3.6).

No que se refere ao desempenho dos sistemas de aterramento, comprovou-se que a prática convencionalmente utilizada, de se aumentar o comprimento de cabo contrapeso como solução para se reduzir a impedância de aterramento em baixas frequências, não surte efeitos no desempenho impulsivo dos aterramentos quando tais comprimentos já sejam da ordem de 100 m. Isto porque o comportamento para frequências acima de cerca de 200 kHz praticamente não sofre alterações. Como alternativa a esta solução recomenda-se adicionar mais cabos, aumentando a ramificação do aterramento. Os resultados obtidos revelaram que para um mesmo comprimento total de cabo, se for utilizado uma configuração com 6 cabos em vez de 4 é possível melhorar não só o comportamento sob correntes a 60 Hz mas também sob impulsos.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Devido ao tempo de processamento computacional necessário para realizar as simulações, é importante otimizar alguns procedimentos utilizados no programa. Dentre as possibilidades, as alternativas que oferecem maior ganho correspondem à utilização de um método de resolução de matrizes mais eficiente que o método da inversão e à implementação de um sistema que permita identificar a simetria dos acoplamentos entre segmentos, evitando a redundância dos cálculos.

No que se refere à metodologia empregada, não foram determinados os acoplamentos dos condutores do sistema de aterramento com cabos de fase e pára-raios da LT, bem como a influência da estrutura na resposta do aterramento. Estes são fatores importantes para a análise global do comportamento da corrente de descarga na LT e, mais particularmente, para a definição da corrente propriamente injetada no sistema de aterramento. A modelagem das ferragens da estrutura e dos cabos de fase e pára-raios e o cálculo dos acoplamentos são obtidos através da representação por dipólos elétricos, sendo consideradas todas as componentes do campo eletromagnético [33], bem como os fenômenos de reflexão e transmissão na interface ar-solo.

Quanto à representação do solo, a modelagem adotada no programa considerou apenas a representação de dois meios de diferentes coeficientes de propagação (ar e solo), separados por uma superfície plana de entre eles. Apesar de a representação de um solo através de um meio homogêneo ser aceitável para estabelecer comportamento em altas frequências, isto não é comumente válido em baixas frequências. Dessa forma, para se determinar mais corretamente, haveria de ser estabelecido um modelo do solo estratificado em camadas, considerando as sucessivas reflexões entre os meios e com o ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NBR 5419, "Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas", ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Junho 1993.
- [2] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, www.ons.org.br.
- [3] FURNAS/INPE, *Utilização de Dados de Descargas Elétricas Atmosféricas para Otimização de Projeto, Operação e Manutenção do Sistema Elétrico*, Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL - Ciclo 2001-2002, 2002.
- [4] PORTELA, C., Apostilas do Curso de Sobretensões e Coordenação de Isolamento, COPPE-UFRJ, Vol. I, II, III e IV, Rio de Janeiro, 1977.
- [5] PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, I - Physical and Methodological Aspects", In: *Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, pp. 379-384, Austin, United States, August 1997.
- [6] PORTELA, C., "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior", In: *Proceedings IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, pp. 1004-1009, Seattle, United States, August 1999.
- [7] PORTELA, C., "Statistical Aspects of Soil Electromagnetic Behavior in Frequency Domain", *Proceedings International Conference on Grounding and Earthing*, 6 p., Belo Horizonte, Brazil, June 2000.
- [8] PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, II - Practical Application Examples", In: *Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, pp. 385-390, Austin, United States, August 1997.
- [9] NOGUEIRA, R. L. S., *Sistema de Aterramento à Freqüência Industrial: Aspectos Teóricos, Computacionais e Práticos*. Projeto Final em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Julho 2001.

- [10] FORTESCUE, C. L., "Counterpoise Tests at Trafford", *Electrical Engineering (AIEE Transactions)*, pp. 1116-1123, July 1934.
- [11] BEWLEY, L. V., "Theory and Tests of the Counterpoise", *Electrical Engineering (AIEE Transactions)*, Vol. 53, pp. 1163-1172, August 1934.
- [12] BELLASCHI, P. L., "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds, Part I", *AIEE Transactions*, Vol. 60, pp. 123-128, March 1941.
- [13] BELLASCHI, P. L., ARMINGTON, R. E., SNOWDEN, A. E., "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds, Part II", *AIEE Transactions*, Vol. 61, pp. 349-363, 1942.
- [14] SUNDE, E. D., "Surge Characteristics of a Buried Bare Wire", *AIEE Transactions*, Vol. 59, pp. 987-991, 1940.
- [15] SUNDE, E. D., *Earth Conductions Effects in Transmission Systems*, New York, *Dover Publications, Inc.*, 1968.
- [16] HEPPE, R. J., "Step Potentials and Body Currents Near Grounds in Two-Layer Earth", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, N° 1, pp. 45-59, January/February 1979.
- [17] HEPPE, R. J., "Computation of Potential at Surface above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, N° 6, pp. 1978-1989, November/December 1979.
- [18] DAWALIBI, F. P., MUKHEDKAR, D., "Resistance Calculation of Interconnected Grounding Electrodes", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, N° 1, pp. 59-65, January/February 1977.
- [19] VERMA, R., MUKHEDKAR, D., "Impulse Impedance of Buried Ground Wire", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, N° 5, pp. 2003-2007, September/October 1980.

- [20] VERMA, R., MUKHEDKAR D., "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, N° 3, pp. 1023-1030, March 1981.
- [21] VELAZQUEZ, R., MUKHEDKAR, D., "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, N° 6, pp. 1314-1322, June 1984.
- [22] OTERO, A. F., CIDRÁS, J., DEL ÁLAMO, J. L., "Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, N° 3, pp. 873-878, July 1999.
- [23] MELIOPOULOS, A. P., MOHARAN, M. G., "Transient Analysis of Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-202, N° 2, pp. 389-399, February 1983.
- [24] PAPALEXOPOULOS, A. D., MELIOPOULOS, A. P., "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, N° 4, pp. 1073-1081, October 1987.
- [25] MENTER, F. E., GRCEV, L. D., "EMTP - Based Model for Grounding System Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, N° 4, pp. 1838-1849, October 1994.
- [26] GRCEV, L. D., "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, N° 2, pp. 815-823, April 1996.
- [27] HEIMBACH, M., GRCEV, L. D., "Grounding System Analysis in Transients Programs Applying Electromagnetic Field Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, N° 1, pp. 186-193, January 1997.
- [28] GRCEV, L. D., "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, N° 4, pp. 1173-1181, November 1990.
- [29] DAWALIBI, F. P., SELBY, A., "Electromagnetic Fields of Energized Conductors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, N° 3, pp. 1275-1284, July 1993.

- [30] XIONG, W., DAWALIBI, F. P., "Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lightning and Similar Surge Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, N° 3, pp. 1412-1420, July 1994.
- [31] OLSEN, R. G., WILLIS, M. C., "A Comparison of Exact and Quasi-Static Methods for Evaluating Grounding Systems at High Frequencies", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, N° 2, pp. 1071-1081, April 1996.
- [32] SALARI FILHO, J. C., PORTELA, C., "Frequency Dependent Behavior of Grounding Systems", In: *Proceedings of the VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, pp. 75-81, Curitiba, November 2003.
- [33] PORTELA, C., *Apostilas do Curso de Campos e Ondas*, COPPE-UFRJ, 3° ed, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- [34] ANSI/IEEE, "Guide for Safety in AC Substation Grounding", *IEEE Power Engineering Society*. IEEE Standards Board 80-1986, March 1985.
- [35] DALZIEL, C. F., LEE, W. R., "Reevaluation of Lethal Electric Currents", *IEEE Transactions*, Vol. IGA-4, N° 5, pp. 467-476, September/October 1968.
- [36] PORTELA, C., "Aspectos Básicos das Condições de Segurança de Pessoas em Relação com Descargas Atmosféricas em Subestações e Linhas de Transmissão", *VIII SNPTEE*, art. SP/GSE/34, 20 p., São Paulo, 1986.
- [37] Publication 479-1, "Effects of Current Passing Through the Human Body", *IEC International Electrotechnical Commission*, Part 1: General Aspects, second edition, 1984.
- [38] Publication 479-5, "Effects of Current Passing Through the Human Body", *IEC International Electrotechnical Commission*, Part 5: Unidirectional Single Impulse Currents of Short Duration, Revision Project, 1984.
- [39] PORTELA, C., "Comportamento de Sistemas de Aterramento para Descargas Atmosféricas, Determinação de Efeitos Relativos a Segurança de Pessoas e Equipamentos e a Interferência em Sistemas de Proteção e Controle", *XIV SNPTEE*, FL/GSI/17, 8p., Belém, 1997.

- [40] PORTELA, C., "Grounding Requirements to Assure People and Equipment Safety Against Lightning", In: *Proceedings IEEE 2000 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, Washington, DC, United States, August 2000.
- [41] PORTELA, C., "Determinação das Resistências de Contato com o Solo, Levando em Conta Camadas de Brita ou Revestimento", *IX SNPTEE*, art. BH/GSE/04, 6 p., Belo Horizonte, 1987.
- [42] BERGER, K., ANDERSON, R., "Parameters of Lightning Flashes", *Electra*, N° 41, pp. 23-37, 1975.
- [43] CHAI, J., MONTEGUT, J., RUSSY, S., "Survey of CGLSS/SLC40 Lightning Data and Retest", In: *Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, pp. 391-396, Austin, United States, August 1997.
- [44] IEC 71-2, "Insulation Co-ordination – Application Guide", *IEC - International Electrotechnical Commission*, International Standard, 3° ed., 1996.
- [45] SANTIAGO, N. H. C., *Atenuação de Surtos em Linhas de Transmissão Devido ao Efeito Corona*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Março 1987.
- [46] PORTELA, C., "Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas, Towers and Buildings - Methodological Aspects", In: *Proceedings IEEE 1998 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, 6 p., Denver, United States, August 1998.
- [47] PORTELA, C., "Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas, Radar Towers - Practical Application Examples", In: *Proceedings IEEE 1998 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Society*, 6 p., Denver, United States, August 1998.
- [48] NOGUEIRA, R. L. S., SANTIAGO, N. H. C., *Avaliação de Sistemas de Aterramento de Estruturas de Linhas de Transmissão à Freqüência Industrial e Sob Solicitações Impulsivas*, Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL Ciclo 2001-2002 - FLUXO/LIGHT N° 44, FLUXO Engenharia, 2002.

- [49] DAVIS, R., JOHNSTON, J. E. M., "The Surge Characteristics of Tower and Tower-Footing Impedances", *Journal of British Electrical and Allied Industries Research Association*, Vol. 88 - Part II, pp. 453-465, July 1941.
- [50] ROCHEREAU, H., "Comportement des Prises de Terre Localisées Parcourues par des Courants à Front Raide", *EDF Bulletin de La Direction des Etudes et Recherches – Reseaux Electriques Materiels Elecques*, N° 2, pp. 13-22, 1988.
- [51] FIEUX, R. C., et al., "The Experimental Station of Saint-Privat-d'Allier", In: *R.G.E.*, Tome 84, N° 1, pp. 44-66, Janvier 1975.
- [52] NOGUEIRA, R. L. S., SANTIAGO, N. H. C., SANTOS JR., G. F., *Análise do Sistema de Aterramento das 69 Subestações do Sistema COELCE*, FLUXO Engenharia, 2001.
- [53] STRATTON, J. A., *Electromagnetic Theory*, New York, *McGraw-Hill, Inc.*, 1941.
- [54] ALVIM, M. ; PORTELA, C. ; NOBREGA, A., "The Importance of Reliable Measurements of Lightning Currents to Electric Power Companies", In: *Proceedings of ILDC 2006 - 19th. International Lightning Detection Conference and ILMC 2006 - 1st. International Lightning Meteorology Conference*, 7 p., Tucson, Arizona, United States, April 2006.

ANEXO A

EQUAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS ASSOCIADAS A FONTES ELEMENTARES

A.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este anexo, obtido de [5] e baseado em [33], apresenta as equações dos campos e potenciais eletromagnéticos referentes às fontes elementares de carga e corrente, utilizadas para se modelar o comportamento dos condutores do sistema de aterramento, que são considerados como sendo subdivididos em segmentos.

Fisicamente, o modelo elementar ainda capaz de respeitar as todas condições impostas pelas equações de Maxwell corresponde ao dipolo elétrico. Por isso, o correto seria representar os elementos infinitesimais de condutor através destes dipolos, determinando-se os potenciais escalar e vetor e os campos elétrico e magnético, bem como as suas componentes, conforme indicado em [33]. Contudo, numa condição limite associada basicamente à dimensão dos condutores e ao coeficiente de propagação do meio (conforme apresentado mais detalhadamente no Item A.5), pode-se determinar os campos elétricos e magnéticos a partir da aproximação dos elementos infinitesimais por fontes pontuais de carga e de injeção de corrente e fontes filamentosas de corrente.

Cumprir observar que os potenciais e os campos produzidos por estas fontes, quando analisados isoladamente, não satisfazem as equações de Maxwell, pois estas fontes independentemente também não são fisicamente realizáveis. A coerência e o atendimento às condições impostas por estas equações ocorrem ao se tratar conjuntamente as fontes em causa e os seus efeitos no meio.

Dessa forma, considerando o regime senoidal (no tempo) e um meio linear, homogêneo e isotrópico e eventualmente dissipativo, as equações de Maxwell associadas a fontes elementares de carga ou corrente podem ser baseadas em ondas esféricas de coordenadas

esféricas. As soluções podem ser decompostas em somas ou séries de funções, permitindo se considerar fontes arbitrárias de corrente e carga. No caso de excitações não senoidais, podem ser obtidas funções senoidais a partir da aplicação da transformada integral de Fourier às diferentes formas de onda no tempo.

Os diferentes meios quando separados por superfícies simples, como as interfaces ar-solo, camadas horizontais e verticais do solo e cilíndricas ou esféricas, podem ser compatibilizadas através dos coeficientes de reflexão e transmissão relacionados às soluções analíticas aplicadas a cada meio e das imagens das fontes, que reproduzem num meio os efeitos de um outro meio existente.

Em se tratando de fontes de geometria simples (como pontos, esferas e cilindros), as soluções podem ser formuladas a partir das seguintes funções de Bessel em coordenadas esféricas, de argumento genérico γ :

$$h_{1/2}^{(1)}(\gamma) = \frac{-i}{\gamma} e^{i\gamma}$$

$$h_{3/2}^{(1)}(\gamma) = -\frac{d\left(h_{1/2}^{(1)}\right)}{d\gamma} = -\left(\frac{1}{\gamma} + \frac{i}{\gamma^2}\right) e^{i\gamma}$$

Considerando um meio linear, homogêneo e isotrópico, representado por um coeficiente de propagação k , associado a um campo eletromagnético senoidal de pulsação $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, representado na forma complexa por $e^{\mp i\omega t}$, tem-se:

$$k = \sqrt{\mu \varepsilon \omega^2 \pm i \omega \mu \sigma} \quad \text{Equação A-1}$$

sendo: μ - permeabilidade magnética do meio;

ε - permissividade elétrica do meio;

σ - condutividade elétrica do meio.

Os potenciais escalar (ψ) e vetor (\vec{A}), bem como os campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{H}) serão representados de acordo com o tipo de fonte em causa: carga pontual, injeção de corrente pontual e filamento de corrente elementar.

A.2 FONTE PONTUAL DE CARGA

Considerando uma carga pontual (ou uma carga em uma esfera de raio reduzido r_C), localizada em um meio homogêneo e variando senoidalmente no tempo, na forma complexa:

$$Q = q e^{\mp i\omega t}$$

Em um ponto P do espaço (no meio caracterizado no item anterior), a uma distância r da carga pontual (ou do centro da esfera de raio r_C , sendo $r \gg r_C$), tem-se que os potenciais escalar e vetor associados a esta carga apresentam a seguinte forma:

$$\psi = K_1 \frac{q}{4\pi} h_{\frac{1}{2}}^{(1)}(\gamma) e^{\mp i\omega t} = -K_1 \frac{q}{4\pi} \frac{i}{\gamma} e^{i\gamma} e^{\mp i\omega t} = -K_1 \frac{q}{4\pi} \frac{i}{kr} e^{ikr} e^{\mp i\omega t} \quad \text{Equação A-2}$$

$$\vec{A} = 0$$

sendo: K_1 - constante

$$\gamma = k \cdot r$$

Por sua vez, os campos associados a esta carga correspondem a:

$$\vec{E} = -\text{grad } \psi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = K_1 \frac{q}{4\pi} h_{\frac{3}{2}}^{(1)}(\gamma) e^{\mp i\omega t} \frac{\partial \gamma}{\partial r} \hat{r}$$

$$\vec{E} = -K_1 \frac{q}{4\pi} \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{i}{\gamma^2} \right) e^{i\gamma} e^{\mp i\omega t} \frac{\partial \gamma}{\partial r} \hat{r} = -K_1 \frac{q}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{i}{kr^2} \right) e^{ikr} e^{\mp i\omega t} \hat{r} \quad \text{Equação A-3}$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot } A = 0$$

sendo \hat{r} o vetor unitário na direção radial, com sentido saindo da carga.

O fluxo de \vec{E} através de uma esfera centrada na carga, de raio r , corresponde a:

$$\phi_E(r) = 4\pi r^2 E_r(r) = -K_1 q \left(r + \frac{i}{k} \right) e^{ikr} e^{\mp i\omega t}$$

Numa condição limite, para um raio muito reduzido (sendo $|k r| \ll 1$), tem-se:

$$\phi_E(r \rightarrow 0) \cong -K_1 q \frac{i}{k} e^{\mp i \omega t} = -K_1 \frac{i}{k} Q \quad \text{Equação A-4}$$

Por sua vez, tem-se que $\nabla \cdot \vec{D} = \varepsilon (\nabla \cdot \vec{E}) = Q$ e por definição:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \phi_E(r \rightarrow 0) \quad \therefore \quad \phi_E(r \rightarrow 0) = \frac{Q}{\varepsilon} \quad \text{Equação A-5}$$

Através das duas equações anteriores, tem-se que $K_1 = \frac{ik}{\varepsilon}$.

O potencial escalar e o campo elétrico associados à carga pontual são então obtidos por:

$$\psi = \frac{q}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{r} e^{ikr} e^{\mp i\omega t}$$

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{r^2} e^{\mp i\omega t} (1 - ikr) e^{ikr} \hat{r}$$

sendo \hat{r} o vetor unitário na direção radial, com sentido saindo da carga.

Dessa forma, o potencial escalar e o campo elétrico podem ser expressos pelas seguintes funções:

$$\psi = \psi_0 F_0(r)$$

$$\psi_0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{r} e^{\mp i\omega t} \quad \text{Equação A-6}$$

$$F_0(r) = e^{ikr}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 F_1(r)$$

$$\vec{E}_0 = -\text{grad } \psi_0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{r^2} e^{\mp i\omega t} \hat{r} \quad \text{Equação A-7}$$

$$F_1(r) = (1 - ikr) e^{ikr}$$

O potencial escalar ψ_0 e o campo elétrico \vec{E}_0 estão associados à aproximação “quase estacionária”, que corresponde à propagação instantânea. As funções F_0 e F_1 incluem o fator de correção referente ao efeito de propagação no meio em causa.

A.3 FONTE PONTUAL DE INJEÇÃO DE CORRENTE

Se no meio em causa, em vez de uma carga pontual Q existir um ponto injetando uma corrente I_T , que corresponde à corrente total (somatório da corrente de condução e deslocamento), representada por $I_T = i_T e^{\mp i\omega t}$.

Tem-se que a corrente de condução (I_C) e de deslocamento (I_D) através de uma superfície esférica de raio r muito reduzido (tal que $|kr| \ll 1$) e centrada na carga, podem ser determinadas por:

$$\begin{aligned} I_C &= i_C e^{\mp i\omega t} = 4 \pi r^2 J_r(r) = 4 \pi r^2 \sigma E_r(r) \\ I_D &= i_D e^{\mp i\omega t} = 4 \pi r^2 \varepsilon \frac{\partial E_r(r)}{\partial t} = 4 \pi r^2 (\mp i\omega) \varepsilon E_r(r) \\ I_T &= I_C + I_D = 4 \pi r^2 (\sigma \mp i\omega \varepsilon) E_r(r) \\ E_r(r) &= \frac{I_T}{4 \pi r^2 (\sigma \mp i\omega \varepsilon)} \therefore \vec{E} = \frac{i_T}{4 \pi r^2 (\sigma \mp i\omega \varepsilon)} e^{\mp i\omega t} \hat{r} \end{aligned}$$

Comparando-se o campo elétrico obtido anteriormente (considerando $|kr| \ll 1$) com o campo obtido na Equação A-7 (fazendo-se também $|kr| \ll 1$), tem-se que para se determinar \vec{E} (e conseqüentemente ψ) em função da corrente injetada no meio (i_T), deve-se substituir o termo $\frac{q}{\varepsilon}$ das equações apresentadas no Item A.2, por $\frac{i_T}{\sigma \mp i\omega \varepsilon}$, sendo os

fatores de correção F_0 e F_1 inalterados. Assim:

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_0 F_0(r) \\ \psi_0 &= \frac{i_T}{4 \pi (\sigma \mp i\omega \varepsilon) r} \frac{1}{r} e^{\mp i\omega t} \\ F_0(r) &= e^{ikr} \end{aligned} \tag{Equação A-8}$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 F_1(r) \\ \vec{E}_0 &= -\text{grad } \psi_0 = \frac{i_T}{4 \pi (\sigma \mp i\omega \varepsilon) r^2} e^{\mp i\omega t} \hat{r} \\ F_1(r) &= (1 - ikr) e^{ikr} \end{aligned} \tag{Equação A-9}$$

A.4 FONTE LONGITUDINAL ELEMENTAR DE CORRENTE

Considerando um filamento condutor de comprimento elementar dl , paralelo ao eixo z e centrado no ponto $x = 0, y = 0, z = 0$, correspondente ao sistema ortogonal Cartesiano XYZ , sendo $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ os respectivos vetores unitários. Admitindo-se também uma corrente I_L percorrendo longitudinalmente o condutor, no sentido crescente de \hat{z} e variando senoidalmente de acordo com:

$$I_L = i_L e^{\mp i\omega t}$$

Num ponto P, de coordenadas x_P, y_P, z_P a uma distância $r = \sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2}$ do centro do segmento, tal que $r \gg dl$, tem-se que o vetor potencial e os campos elétricos e magnéticos associados à fonte de corrente são definidos por:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \frac{\mu i_L dl}{4\pi r} e^{\mp i\omega t} e^{ikr} \hat{z} \\ \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \pm \frac{i\omega \mu i_L dl}{4\pi r} e^{\mp i\omega t} e^{ikr} \hat{z} \\ \vec{H} &= \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} = \frac{i_L dl}{4\pi r^2} e^{\mp i\omega t} (1 - ikr) e^{ikr} \left(-\frac{y_P}{r} \hat{x} + \frac{x_P}{r} \hat{y} \right) \end{aligned} \quad \text{Equação A-10}$$

De forma análoga aos itens anteriores, pode-se estabelecer o potencial vetor e os campos elétrico e magnético a partir das seguintes formulações:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \vec{A}_0 F_0(r) \\ \vec{A}_0 &= \frac{\mu i_L dl}{4\pi r} e^{\mp i\omega t} \hat{z} \\ F_0(r) &= e^{ikr} \end{aligned} \quad \text{Equação A-11}$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 F_0(r) \\ \vec{E}_0 &= \pm \frac{i\omega \mu i_L dl}{4\pi r} e^{\mp i\omega t} \hat{z} \end{aligned} \quad \text{Equação A-12}$$

$$\begin{aligned}\vec{H} &= \vec{H}_0 F_1(r) \\ \vec{H}_0 &= \frac{i_L}{4\pi} \frac{dl}{r^2} e^{\mp i\omega t} \left(-\frac{y_P}{r} \hat{x} + \frac{x_P}{r} \hat{y} \right) \\ F_1(r) &= (1 - ikr) e^{ikr}\end{aligned}\tag{Equação A-13}$$

Como se pode observar, a relação entre o vetor potencial e os campos elétrico e magnético na aproximação quase estacionária (\vec{A}_0 , \vec{E}_0 e \vec{H}_0) com as respectivas grandezas considerando o efeito da propagação (\vec{A} , \vec{E} e \vec{H}), são estabelecidas através das mesmas funções F_0 e F_1 obtidas para os Itens A.2 e A.3.

A.5 MODELAGEM DOS CONDUTORES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Conforme tratado no Item A.1, a representação fisicamente correta dos condutores corresponde à modelagem dos elementos infinitesimais através dipolos. Contudo, numa condição em que o comprimento dos condutores a seja tal que $|k \cdot a| \ll 1$ (sendo k coeficiente de propagação no meio em causa, de acordo com a Equação A-1) ou que possa ser admitida uma variação desprezível do campo eletromagnético ao longo dos mesmos, é razoável admitir, de acordo com [5, 33], um modelo infinitesimal representado por uma fonte pontual de injeção de corrente no solo e uma fonte elementar de corrente longitudinal, como apresentado nos Itens A.3 e A.4, respectivamente.

Tal consideração implica na necessidade de subdividir os condutores em segmentos, sendo definido um comprimento máximo de segmentos a na qual sejam satisfeitas as condições supracitadas. É importante observar que este comprimento depende do coeficiente de propagação k do solo, que por sua vez é obtido através dos parâmetros elétricos do mesmo e da frequência da fonte em causa, de acordo com a Equação A-1. Todavia, adicionalmente há de se considerar um comprimento de segmentos a em que seja possível admitir uma corrente transversal uniformemente distribuída ao longo do seu comprimento e uma corrente longitudinal uniforme pelo mesmo, conforme analisado mais detalhadamente no Item 3.1.2.

Os potenciais e os campos associados a cada um dos segmentos são calculados a partir da integração das equações apresentadas nos itens anteriores. Dessa forma definem-se as impedâncias próprias e mútuas, através dos acoplamentos transversais e longitudinais entre todos os segmentos, nos quais são subdivididos os condutores que compõem o sistema de aterramento. No que se refere à impedância interna dos segmentos de condutor, pode se determiná-la com o modelo apresentado em [45]. No Item 3.1.2, é descrita a metodologia de cálculo das grandezas associadas.

Em se tratando de meios com diferentes coeficientes de propagação separados por superfícies como ar-solo ou camadas de solo, há de se considerar os fenômenos de reflexão e transmissão nestas interfaces, obtidos através das condições de fronteira nas mesmas e representados através das correspondentes imagens da fonte principal.

A.6 REPRESENTAÇÃO DOS FENÔMENOS DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO

O comportamento das ondas refletida e transmitida nas interfaces entre meios de diferentes coeficientes de propagação (parâmetros eletromagnéticos distintos) é definido a partir das condições de fronteira dos campos. Considerando dois meios caracterizados pelos índices 1 e 2, tem-se as seguintes condições na superfície:

- Continuidade da componente tangencial de \vec{E} : $\vec{E}_{t1} = \vec{E}_{t2}$;
- Continuidade da componente tangencial de \vec{H} : $\vec{H}_{t1} = \vec{H}_{t2}$;
- Descontinuidade da componente normal de \vec{D} : $\vec{D}_{n1} - \vec{D}_{n2} = \rho$;
- Continuidade da componente normal de \vec{B} : $\vec{B}_{n1} = \vec{B}_{n2}$;

sendo ρ a densidade de carga na superfície.

Contudo, a relação mais adequada para ser determinar a condição fronteira de \vec{D} corresponde ao princípio da conservação de carga na superfície, definido a partir da equação de continuidade:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

Como \vec{J} pode ser obtido por: $\vec{J} = (\sigma + i\omega\epsilon) \cdot \vec{E}$, tem-se portanto:

$$\nabla \cdot ((\sigma + i\omega\epsilon)\vec{E}) = 0$$

Dessa forma, considerando as condições supracitadas, pode-se determinar os campos eletromagnéticos refletidos e transmitidos na interface entre meios de diferentes coeficientes de propagação. Como nesta tese o solo será tratado como um meio homogêneo, a única interface a ser considerada será a superfície ar-solo.

Contudo, a representação da reflexão e transmissão nas diferentes camadas do solo (utilizadas comumente para se modelar a heterogeneidade do mesmo) pode ser obtida de forma semelhante à descrita a seguir, mas havendo de se considerar as sucessivas reflexões da onda originalmente produzida tanto na superfície solo-ar como na interface entre as camadas de solo.

Devido às características dos campos produzidos pelas fontes elementares de corrente descritas nos itens A.3 e A.4, utilizadas para modelar os elementos infinitesimais dos condutores, deve-se considerar distintamente a reflexão e a transmissão dos mesmos. A parcela referente ao campo produzido pela fonte elementar de corrente longitudinal, junto ao ponto de incidência na superfície solo-ar, será tratada como onda plana. Por sua vez, a componente radial do campo elétrico, obtida pela fonte pontual de corrente transversal injetando no solo pode ser obtida através das condições de contorno anteriormente descritas.

Cumprе observar que a análise conjunta dos campos ora mencionados e a aplicação das condições de fronteira aos mesmos conduzem a esse tratamento independente das parcelas.

Será considera a notação e a convenção para ondas planas descrita em [33], obtida a partir de [53], no que se refere ao comportamento das ondas refletidas e transmitidas, representadas a partir dos coeficientes de transmissão e reflexão associados à fonte principal.

Definindo-se o plano de incidência vertical formado entre a fonte, o ponto na superfície do solo e a ponto onde se deseja calcular o campo, tem-se que o campo elétrico será decomposto numa componente normal a este plano \vec{E}_n e numa componente paralela ao mesmo \vec{E}_p . Estas componentes sofrem processos de reflexão e refração distintos, sendo definidos a partir do ângulo de incidência na superfície do solo (θ_0) e das características dos meios envolvidos.

Considerando uma onda plana se propagando no meio 2 e incidindo na interface entre este meio e o meio 1 (ambos caracterizados pelos respectivos parâmetros $\sigma_2, \omega_2, \mu_2$ e $\sigma_1, \omega_1, \mu_1$), os campos elétricos refletidos \vec{E}_2 e transmitidos \vec{E}_1 terão suas componentes normais e tangenciais ao plano de incidência determinadas por:

$$E_{1N} = \frac{2\mu_1 k_2 \cos\theta_0}{\mu_1 k_2 \cos\theta_0 + \mu_2 \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \sin^2\theta_0}} E_{0N}$$

$$E_{2N} = \frac{\mu_1 k_2 \cos\theta_0 - \mu_2 \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \sin^2\theta_0}}{\mu_1 k_2 \cos\theta_0 + \mu_2 \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \sin^2\theta_0}} E_{0N}$$

$$E_{1P} = \frac{2\mu_1 k_1 k_2 \cos\theta_0}{\mu_2 k_1^2 \cos\theta_0 + \mu_1 k_2 \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \sin^2\theta_0}} E_{0P}$$

$$E_{2P} = \frac{\mu_2 k_1^2 \cos\theta_0 - \mu_1 k_2 \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \sin^2\theta_0}}{\mu_2 k_1^2 \cos\theta_0 + \mu_1 k_2 \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \sin^2\theta_0}} E_{0P}$$

sendo: θ_0 – ângulo de incidência da onda na superfície entre os meios (com a vertical);

k_1, k_2 – coeficientes de propagação nos meios 1 e 2;

μ_1, μ_2 – permeabilidade magnética nos meios 1 e 2.

Em se tratando dos meios envolvido, pode-se eliminar as variáveis μ_1 e μ_2 das equações anteriores, uma que é possível considerar $\mu_1 = \mu_2$.

A onda refletida se caracteriza por apresentar uma direção de propagação com um θ_2 (com a vertical) e a onda transmitida um ângulo θ_1 (com a vertical). Pela lei de Snell, estes ângulos são definidos por:

$$\text{sen}\theta_0 = \text{sen}\theta_2$$

$$k_2 \text{sen}\theta_0 = k_1 \text{sen}\theta_1$$

Que correspondem a:

$$\theta_0 = \theta_2$$

$$k_1 \cos\theta_1 = \sqrt{k_1^2 - k_2^2 \text{sen}\theta_0}$$

Como pode se constatar por estas expressões, a mudança de direção ocorrida na onda transmitida, implica em se considerar um método iterativo que determine para qual ângulo de incidência tem-se uma onda refratada que atinja o ponto onde se deseja calcular o campo.

Em relação à componente radial, decompondo em componente radial e perpendicular à superfície e aplicando as condições de contorno do campo elétrico tangencial e o princípio da conservação de carga, tem-se os seguintes coeficientes:

$$E_{1R} = \frac{2(\sigma_2 - i\omega\varepsilon_2)}{(\sigma_1 + \sigma_2) - i\omega(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} E_{0R}$$

$$E_{2R} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) - i\omega(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{(\sigma_1 + \sigma_2) - i\omega(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} E_{0R}$$